

ESTUDO DO PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO EM MATERIAIS COMPÓSITOS

Produção de tampa de bagageira para autocarro

INÊS ABREU FREIRE LOPES

MESTRADO EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Orientador FEUP: Prof. Manuel Fernando Gonçalves Vieira

Orientador CaetanoBus: Eng. Filipe Fernandes

<i>Candidato</i>	Inês Abreu Freire Lopes	<i>Código</i>	040508005
<i>Título</i>	Estudo do Processo de Infusão a Vácuo em Materiais Compósitos		
<i>Data</i>	10 de Setembro de 2009		
<i>Local</i>	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala C603 - 10:00h		
<i>Júri</i>	<i>Presidente</i>	Professor Doutor José Cavalheiro	DEMM/FEUP
	<i>Arguente</i>	Professor Doutor Aníbal Guedes	
	<i>Orientador</i>	Professor Doutor Manuel Vieira	DEMM/FEUP

Agradecimentos

A elaboração desta tese foi desenvolvida na CaetanoBus com a colaboração do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMM) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, estando enquadrada num projecto de investigação da CaetanoBus – Grupo Salvador Caetano, envolvendo a implementação do processo de infusão a vácuo para a produção de tampas de compartimento de bagageira de auto-carros. A parte experimental foi realizada no Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros (PIEP) na Universidade do Minho, no laboratório do DEMM e na CaetanoComponents S.A. pertencente ao Grupo Salvador Caetano. A estas instituições agradeço todos os meios colocados à minha disposição para a elaboração da tese.

Ao Prof. Manuel Vieira, orientador na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela disponibilidade manifestada para orientar este trabalho, pelo imprescindível apoio prestado e pela exigência de método e rigor em todas as fases da execução deste trabalho. Gostaria de ratificar a sua competência, participação com discussões, correcções e sugestões que fizeram com que concluísse este trabalho.

Ao Eng. Filipe Fernandes, a quem coube a orientação na empresa CaetanoBus desta dissertação de mestrado, os meus agradecimentos pela pronta disponibilidade, pela revisão crítica do texto, pelos esclarecimentos, opiniões e sugestões, pela acessibilidade e cordialidade demonstradas, pela confiança e estímulo que se tornaram decisivos na elaboração desta tese.

Ao Eng. Eurico Coelho e ao Eng. Rui Miranda, da Caetano Components S.A., pela disponibilidade e pelo interesse demonstrado ao longo de toda este trabalho.

Ao Prof. Ferrie Van Hattum, Professor Auxiliar na área de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho pelo seu contributo na estruturação da minha tese, orientação e ensinamentos prestados na elaboração da tese.

À Franziska Regel e ao Ricardo Macedo, do PIEP – Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros, localizado na Universidade do Minho, pela colaboração, pela prestação dedicada à vertente prática desta dissertação, revelando sempre profissionalismo e criatividade na procura de soluções.

Resumo

O processo de infusão a vácuo é uma técnica de injeção de resina alternativa aos processos manuais em molde aberto, “hand lay-up” e “spray lay-up”. Este processo caracteriza-se essencialmente pela utilização de um molde flexível, o qual é submetido à pressão do vácuo para injectar a resina para o interior do material de reforço.

O principal objectivo deste trabalho foi estudar e avaliar a viabilidade do processo de infusão a vácuo para produção de tampas para compartimentos de bagageira de autocarros em material compósito, na CaetanoBus, abordando os benefícios e os inconvenientes que se obtém com esta nova integração. O estudo da implementação deste processo foi complementado com vários ensaios práticos enquadrados nesta aplicação.

Neste trabalho foram testadas várias características dos produtos obtidos por infusão a vácuo, nomeadamente, foi determinada a resistência da adesão da ligação entre um compósito e um metal com recurso a vários ensaios de tracção. As amostras foram fabricadas pelo processo de infusão a vácuo onde foram incorporados insertos metálicos em diferentes posições e com diferentes tratamentos de superfície. Posteriormente foi determinada a resistência à flexão do material compósito através de ensaios de flexão. No final foi ainda feito um teste a uma tampa de bagageira de autocarro em material compósito fabricada por infusão a vácuo, que simulava o movimento de abrir e fechar da tampa durante o seu ciclo de vida, para a observação do comportamento de insertos metálicos colocados na dobradiça da tampa.

Este trabalho, supervisionado pelo Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da FEUP, foi realizado na CaetanoBus, uma empresa de fabricação de carroçarias e veículos para o transporte público de passageiros, em conjunto com a Caetano Components S.A. e com a participação do PIEP – Pólo de Inovação em Engenharia de Polímeros.

PALAVRAS-CHAVE: Processo de infusão a vácuo, Adesão de ligações.

Abstract

The Vacuum Infusion Process is a technique for injection of resin as an alternative to manual processes with open mold, hand lay-up and spray lay-up. This process is characterized by the use of a flexible mold subjected to pressure from vacuum to suck the resin into the reinforcement.

The main objective of this project was the study and evaluate of the feasibility of the vacuum infusion process to produced in composite material bus luggage compartment lid, at CaetanoBus, referring advantages and disadvantages of this integration. Several experimental tests have been carried out to study the implementation of this new component.

In this work several characteristics of the products obtained by vacuum infusion were tested, in particular, was determined the strength of the adhesive bonding between a composite and a metal using tensile tests. Metals inserts are embedded in different positions of the samples manufactured by vacuum infusion process. The metal inserts were subjected to surface treatments. The resistance to bending of the composite material through flexion tests was determined. In the final was also done a test to a luggage compartment lid in composite material manufactured by vacuum infusion, which simulated the movement to open and close of the lid, to simulate the behavior of metal inserts placed in the hinge of the lid, during its life cycle.

This was supervised by the Department of Metallurgy and Materials Engineering at FEUP and was performed in CaetanoBus, in association with Caetano Components S.A., and with the participation of PIEP - Innovation in Polymer Engineering.

KEYWORDS: Vacuum infusion process, Adhesive bonding.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	7
1.2. OBJECTIVOS	9
2. MATERIAIS COMPÓSITOS.....	10
2.1. MATERIAIS DE REFORÇO	12
2.2. MATRIZES.....	13
2.3. ARRANJOS GEOMÉTRICOS.....	15
2.4. DESIGN	17
2.5. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	18
2.6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS.....	24
2.7. ADESÃO DE LIGAÇÕES	25
3. PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO	29
3.1. O PROCESSO.....	29
3.2. VANTAGENS E INCONVENIENTES DO VIP	33
3.2.1. VIP VERSUS RTM.....	35
3.2.2. VIP VERSUS PROCESSO ACTUAL NA EMPRESA	36
3.3. ASPECTO AMBIENTAL.....	37
3.4. ASPECTO ECONÓMICO	38
3.5. APLICAÇÕES	40
4. ESTUDO EXPERIMENTAL.....	45
4.1. ADESÃO DE LIGAÇÕES ENTRE COMPÓSITO E METAL.....	46
4.1.1. PRODUÇÃO DE AMOSTRAS COM INTRODUÇÃO DE INSERTOS NO PROCESSO.....	46
4.1.2. PRODUÇÃO DE AMOSTRAS SEM A INTRODUÇÃO DE INSERTOS NO PROCESSO	51
4.1.3. ENSAIOS DE TRACÇÃO	53
4.2. COMPORTAMENTO DE INSERTOS METÁLICOS EM MATERIAL COMPÓSITO.....	56
4.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO MATERIAL COMPÓSITO	58
4.3.1. ENSAIO DE FLEXÃO	58
5. CONCLUSÕES	60
BIBLIOGRAFIA.....	61

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A CaetanoBus é uma empresa de fabricação de carroçarias e veículos para o transporte público de passageiros. Fundada em 2002 como resultado de uma parceria entre os Grupos Salvador Caetano e Daimler Chrysler, que nela participam através das suas representadas Saltano SGPS (74%) e Evobus Portugal (26%), a CaetanoBus integrou na sua estrutura a Divisão Fabril de Gaia, até então pertencente à Salvador Caetano - IMVT. A parceria estabelecida com a Evobus em 2002 veio possibilitar à CaetanoBus a aquisição de novos métodos de fabrico e gestão, que aliados ao know-how proveniente da anterior Divisão Fabril de Gaia da Salvador Caetano IMVT, permitiu desenvolver uma tecnologia de produção ao nível dos melhores fabricantes europeus.








A fábrica dispõe de uma área total de 150.000 m² com cinco divisões principais, sendo duas de montagem que se repartem por uma de montagem de modelos em produção e outra para desenvolvimento de protótipos, uma de pintura, uma de acabamentos e uma de retoques finais para entrega aos clientes. Existem ainda os armazéns de peças, materiais, tintas e dos comerciais pós-venda.

As carroçarias produzidas pela CaetanoBus são montadas sobre chassis de várias marcas e com diferentes especificações, tabela 1, consoante as exigências do cliente. O principal destino da maioria dos produtos da empresa é a exportação, salientando-se os mercados Alemão, Inglês e Espanhol.

A CaetanoBus visa potencializar uma melhoria contínua dos seus produtos e investir numa eficiente utilização dos seus recursos. A empresa pretende afirmar-se como uma referência em qualidade/preço no fabrico de carroçarias para automóveis de transporte de passageiros. O aumento sustentado da capacidade competitiva, o respeito pelos parceiros de negócio e o gosto pela inovação são outras características da CaetanoBus, uma empresa que se orgulha de ser social e ambientalmente responsável. (1)

As actividades desenvolvidas no âmbito deste estágio enquadram-se no Departamento de Concepção e Desenvolvimento designado por ENG. Este sector técnico tem como missão a completa definição do produto, fornecendo aos sectores adjacentes a informação necessária à sua concepção, de forma a facilitar os processos que daí decorrem e garantir a satisfação de todos os clientes. O departamento de ENG está directamente ligado com outros departamentos dentro da empresa, que em conjunto cooperam em toda a linha de desenvolvimento de um novo produto.

Tabela 1- Modelos produzidos pela CaetanoBus actualmente. (1)

Modelo	Descrição	Imagem
Levante	Veículo de transporte de passageiros de turismo que se caracteriza como o primeiro auto-carro a ser projectado para ser 100% acessível.	
Winner	Veículo de transporte de passageiros que representa uma referência internacional, dado que, a sua carroçaria foi projectada para se adaptar a todos os chassis e especificações.	
City-Gold	Veículo de transporte de passageiros urbano com uma excelente funcionalidade, ergonomia, amplo espaço interior, manutenção simplificada e elevada segurança.	
Enigma	Veículo de transporte de passageiros de grande turismo, moderno e inovador. O seu design, a escolha dos materiais, os elevados níveis de segurança e a sua performance contribuem para o elevado conforto.	
Cobus	Veículo de transporte de passageiros de aeroporto cujo objectivo principal é a redução do tempo, entre o check-in e o embarque. Este veículo caracteriza-se por uma manutenção é rápida e económica.	
Tourino	Autocarro midi de transporte de passageiros de média dimensão que oferece uma segurança avançada, ergonomia e um design apelativo.	
Double-Deck	Veículo para circuito urbano com capacidade para 115 passageiros que se caracteriza por uma carroçaria totalmente em alumínio.	

1.2.OBJECTIVOS

Este trabalho tem como principal objectivo estudar a implementação do processo de infusão a vácuo na CaetanoBus – Grupo Salvador Caetano, para a fabricação de tampas de bagageira de autocarro em material compósito. Este processo caracteriza-se por uma técnica de injeção de resina de baixo custo que consiste em colocar o material de reforço sobre um molde rígido no qual a resina é introduzida para a obtenção do produto final.

Actualmente, as tampas são produzidas em alumínio por um processo manual, onde as chapas são fabricadas com recurso a processos de corte a laser, soldadura e conformação mecânica, o que contribui para um elevado custo de mão-de-obra, elevado peso das peças e um elevado tempo de fabricação.

Os objectivos desta dissertação visam analisar algumas das principais características dos produtos obtidos pelo processo de infusão a vácuo, nomeadamente, a adesão de ligações entre um material compósito e um metal, a resistência à flexão do material compósito e o comportamento de insertos metálicos em tampas de bagageira de um auto-carro modelo Levante de material compósito. Posteriormente, foi ainda realizada uma breve análise à vertente económica e ambiental associada a este processo e à sua implementação na empresa, abordando os benefícios e inconvenientes deste investimento.

A resistência da adesão de ligações entre o material compósito e um metal foi determinada através da realização de ensaios de tracção, em provetes constituídos pelos dois materiais. A resistência à flexão do material compósito foi também determinável. Por fim o comportamento de insertos metálicos em tampas de material compósito foi observado através de um ensaio prático, solicitando a tampa a esforços cíclicos que simulavam o movimento de abrir e fechar da tampa.

As amostras para os ensaios de tracção e de flexão foram produzidas pelo processo de infusão a vácuo. Durante a fabricação das amostras foram incorporados insertos metálicos nas fibras no processo de infusão a vácuo para analisar a resistência das ligações entre ambos os materiais. A estes insertos foram implementadas diversas variáveis nas suas propriedades para analisar e comparar as diferenças na adesão das superfícies destes materiais. As variáveis a ser analisadas caracterizam-se por um tratamento de superfície que engloba o desengorduramento e aumento da rugosidade da superfície das amostras. Outra das variáveis introduzidas caracteriza-se pela realização de perfurações de pequeno diâmetro na zona da sobreposição de ambos os materiais.

Este trabalho pretende assim demonstrar as vantagens e inconvenientes da implementação do processo de infusão a vácuo, apresentando as melhorias alcançadas ao nível das propriedades do material, da economia de peso e consequente redução do combustível, da diminuição do impacto ambiental e ainda ao nível da capacidade de integrar num só processo várias etapas de fabricação.

2. MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos ocupam actualmente um lugar destacado entre os materiais de engenharia, devido às vantagens que possuem relativamente aos materiais tradicionais, entre as quais se distinguem, facilidade de processamento, elevada rigidez, resistência mecânica e o baixo peso específico dos compósitos de matriz polimérica. O conceito de material compósito significa que dois ou mais materiais são combinados à escala macroscópica para dar origem a um terceiro material. O exemplo clássico e mais vulgar são os compósitos fibrosos, que resultam da dispersão de fibras numa matriz. Uma das principais razões para as excelentes propriedades dos compósitos resulta do facto das fibras promoverem propriedades mecânicas muito superiores à dos materiais idênticos na sua forma maciça. (2; 3)

Historicamente, os materiais compósitos têm uma origem muito antiga, datando dos primórdios da Humanidade. O surgimento da fibra de vidro ocorreu no século XVIII, mas apenas em 1939 esta fibra passou a ser produzida comercialmente, visando aplicações de componentes eléctricos em altas temperaturas. Duas décadas depois, iniciou-se a produção das chamadas fibras avançadas, tais como, as fibras de boro e as fibras de carbono. Actualmente, as fibras de carbono e as fibras de vidro constituem os principais agentes de reforço usados em materiais compósitos. (3; 4)

A partir da década de 1960 ocorreu um grande impulso no desenvolvimento tecnológico dos materiais compósitos. Os principais factores responsáveis foram a grande evolução que houve no fabrico de materiais poliméricos, que representam os principais materiais utilizados como matrizes em compósitos, e o início da produção de fibras sintéticas, como as fibras de vidro, carbono, aramida, entre outras, em larga escala. A necessidade de novos materiais para estruturas de alto desempenho representou o grande estímulo para o crescimento sucessivo dos materiais compósitos. Novas linhas de aeronaves, artigos desportivos e estruturas de engenharia civil estão, actualmente, em desenvolvimento e aperfeiçoamento, contribuindo para o aumento do consumo de materiais compósitos avançados. (4)

A maioria dos materiais compósitos consiste num material de base, designado por matriz, que confere estrutura ao compósito e preenche os espaços vazios, e um material de reforço que promove as propriedades mecânicas, apresentando-se geralmente na forma de fibras. As principais propriedades que podem ser alcançadas com um material compósito caracterizam-se por uma elevada resistência, rigidez, resistência à corrosão, resistência ao desgaste, baixo peso, resistência à fadiga, isolamento térmico, condutividade térmica e isolamento acústico. (2; 5)

A classificação dos materiais compósitos é distinguida em dois níveis, de acordo com os constituintes da matriz e do material de reforço. Relativamente à matriz as diferentes classes de compósitos dividem-se em compósitos de matriz orgânica (OMCs), compósitos de matriz metálica (MMCs) e compósitos de matriz cerâmica (CMCs). Os compósitos de matriz orgânica incluem duas sub-classes, os compósitos de matriz polimérica e os compósitos de matriz de carbono usualmente, designados por compósitos carbono-carbono. O segundo nível de classificação refere-se à forma do reforço, podendo os materiais compósitos ser divididos em quatro tipos diferentes, designados por compósitos de fibras contínuas, compósitos de fibras descontínuas, compósitos particulados e compósitos de fibras contínuas em forma de malha ou tecido. (2; 6)

Actualmente, os compósitos de matriz polimérica representam a classe de materiais compósitos com maior sucesso no mercado com uma vasta gama de aplicações desde produtos electrónicos, como placas de circuitos impressos, a estruturas avançadas na indústria aeroespacial. Esta escolha deve-se às diversas propriedades que podem ser alcançadas com a combinação de fibras de vidro, carbono, aramida ou polietileno, juntamente com polímeros termoplásticos ou termoendurecíveis como material de matriz. A configuração da fibra e o tratamento de superfície da fibra de acordo com as características de interface pretendidas determinam as propriedades finais e a durabilidade do material compósito. (7)

Resumidamente podemos inferir que as propriedades dos materiais compósitos de matriz polimérica são determinadas pelos seguintes parâmetros:

- Propriedades da fibra;
- Propriedades da resina;
- Razão de fibra/resina no material compósito;
- Geometria e orientação das fibras no material compósito.

O material de reforço mais utilizado para promover a elevada resistência e rigidez destes materiais compósitos é a fibra de vidro. Ambos os compósitos reforçados por fibras de vidro contínuas e descontínuas apresentam uma vasta comercialização e utilização, desde aplicações não estruturais e com baixo desempenho até aplicações com elevado desempenho. As razões para esta elevada aplicabilidade devem-se ao seu custo competitivo, disponibilidade, fácil processamento e elevada resistência mecânica. (6)

A selecção do material mais adequado para uma determinada aplicação é um parâmetro que exige muito conhecimento e uma análise aprofundada das variáveis existentes. Todos os requisitos da aplicação devem ser conhecidos para a definição de um critério de design da peça. Este parâmetro é essencial para prever a resposta de um material quando solicitado a um determinado esforço. A selecção feita na escolha destes materiais não é arbitrária. As duas ou mais fases devem ser escolhidas cuidadosamente, o que é tanto mais crítico quanto maior for a exigência da aplicação do material.

2.1. MATERIAIS DE REFORÇO

O principal objectivo do material de reforço é implementar elevados níveis de resistência e rigidez a um material compósito. Quando um compósito é reforçado por fibras contínuas, estas asseguram praticamente toda a resistência e rigidez do material, e até mesmo nos compósitos reforçados por partículas o aumento das propriedades já é significativo. A combinação de uma matriz de baixo peso específico com um reforço de alta resistência pode levar à obtenção de um material compósito com um excelente desempenho e elevada aplicabilidade. (6)

Actualmente, as fibras representam o principal material de reforço utilizado em materiais compósitos. As razões que levam à sua vasta aplicação devem-se principalmente ao seu tamanho. As fibras são caracterizadas geometricamente não só pela sua excelente razão comprimento/diâmetro mas também pelo seu reduzido diâmetro. Esta característica é relevante em materiais de pequenas dimensões, uma vez que, quanto menor for o tamanho do material, menor será o diâmetro na fibra e menor o número médio de defeitos na sua secção, o que promove uma elevada resistência ao material. O efeito microestrutural também contribui para o uso destas fibras, uma vez que certos materiais ao serem processados em fibras sofrem uma alteração da sua estrutura cristalina ou molecular, no sentido longitudinal, aumentando a resistência mecânica da fibra. O efeito geométrico provoca influência directa no material de reforço, uma vez que, quanto mais elevada for a área de contacto, ou seja, quanto maior for a relação comprimento/diâmetro da fibra e maior a coesão interfacial entre a fibra e a matriz, maior será a absorção dos esforços impostos ao material. (2)

As fibras de vidro representam um dos materiais industriais mais versáteis nos dias de hoje, ocupando uma posição distinta devido à sua alta resistência e baixo custo de produção. A fibra de vidro caracteriza-se por apresentar inúmeras vantagens no seu desempenho, nomeadamente, elevadas propriedades mecânicas, como resistência à tracção e ao impacto, elevada dureza, flexibilidade e rigidez, baixo peso, baixo coeficiente de dilatação térmica, baixa absorção de água, elevada resistência à corrosão e à oxidação, nenhuma restrição quanto ao tamanho e ao formato da peça, óptimo acabamento superficial e ainda se apresenta como sendo 100% recuperável. O mercado de compósitos reforçados por fibra de vidro é predominantemente baseado em fibra de vidro do tipo E, de acordo com uma grande variedade de formatos, tipos de resina, aditivos e uma vasta gama de tecnologias de fabrico. (6; 7)

As propriedades de um material compósito de plástico reforçado por vidro dependem de uma grande número de factores de fabricação, dentro dos quais se destacam a formulação de resina, os filamentos, as condições de cura, o tipo e a quantidade de material de reforço, o agente de acoplamento e o processo de fabricação. Quanto à deterioração destes materiais, a grande parte dos seus efeitos está confinada à superfície do material, contudo, a região da superfície poderá ser modificada para se obter de uma maior resistência à fractura, podendo ser aplicado um gel como

superfície de acabamento do compósito que protege a interface resina/vidro contra os efeitos de humidade e temperatura. A utilização de compósitos reforçados por fibra de vidro na indústria automóvel e aeroespacial tem aumentado consideravelmente nos últimos anos devido às suas propriedades, caracterizadas por um elevado amortecimento, boa resistência à corrosão e um reduzido coeficiente de expansão térmica. (3; 6; 8)

Em suma, as fibras usadas nos compósitos têm uma grande influência nas propriedades finais destes materiais, que dependem de diversos parâmetros, nomeadamente, das propriedades mecânicas da fibra, da superfície de contacto da fibra com a resina, do teor de fibra no compósito e da orientação das fibras no compósito. Podemos inferir que, quanto menor for o diâmetro das fibras e menor o espaçamento entre elas, maior será a fracção de volume de fibra do compósito, conferindo a este material uma elevada resistência mecânica. (3)

2.2. MATRIZES

Naturalmente as fibras não têm uma grande utilidade, excepto quando se encontram combinadas com outro material, para que possam adquirir forma e estrutura para suportar forças. O material ligante é regularmente designado por matriz. Os principais objectivos da matriz caracterizam-se pela interligação entre o material de reforço através das suas características de coesão e adesão, transferência de forças ao longo do material de reforço e ainda protecção do reforço dos impactos ambientais e do seu manuseamento. Deste modo, a matriz assegura uma forma sólida ao material compósito, o que facilita o seu manuseamento durante a sua fabricação. Este parâmetro é particularmente necessário em compósitos reforçados por fibras descontínuas, dado que os reforços não são suficientemente compridos para promover uma forma estável. (2)

Uma vez que os reforços são geralmente mais fortes e rígidos, a matriz é considerada a ligação fraca no compósito, segundo uma perspectiva estrutural. Contudo, caracterizando-se como uma fase contínua, a matriz controla as propriedades transversais, a resistência interlaminar e a resistência a elevadas temperaturas do material compósito. Tipicamente, a matriz é caracterizada por uma baixa densidade, rigidez e resistência. Uma boa combinação entre a matriz e a fibra pode alcançar elevadas resistências mantendo a baixa densidade. (2)

Os materiais que constituem as matrizes podem ser polímeros, metais, cerâmicos ou carbono. Os materiais compósitos poliméricos são actualmente os compósitos mais utilizados no mercado. Estes materiais podem, no entanto, ser divididos em termoplásticos e termoendurecíveis, consoante a alteração do seu comportamento mecânico e químico com a variação de temperatura. As matrizes termoplásticas são constituídas maioritariamente pelos designados plásticos técnicos e deformam-se com o aumento da temperatura, estas são também utilizadas para produzir compósitos de baixo custo com uma elevada tenacidade, elevada resistência ao impacto e uma reduzida higroscopicidade quando comparados com as matrizes termoendurecíveis.

Entre os termoplásticos mais comuns podemos destacar o polipropileno, o policloreto de vinila, o nylon e o poliuretano. As matrizes termoendurecíveis são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais bastante rígidas, não podendo ser reprocessados, ou seja, uma vez aquecidos assumem uma forma permanente. Uma das vantagens das resinas termoendurecíveis é a maior facilidade de impregnação do reforço, dado que, antes da cura, apresentam viscosidades bastante inferiores às dos termoplásticos. Entre este tipo de polímeros termoendurecíveis destacam-se os mais comuns, tais como, as resinas poliéster, epóxi, fenólica e poliamida. (2; 3)

Actualmente, as resinas poliéster são os materiais poliméricos mais amplamente utilizados em matrizes devido ao seu reduzido custo e facilidade de produção. As resinas poliéster classificam-se em duas grandes classes designadas, respectivamente, por saturadas e insaturadas. No primeiro grupo estão os poliésteres comercializados sob a forma de filme ou fibras, resinas termoplásticas ou plasticizadores poliméricos. As resinas de poliéster insaturado são das mais utilizadas no fabrico de materiais compósitos. Os compósitos de fibra de vidro reforçados com resina poliéster são caracterizados por um peso reduzido, resistência a ambientes agressivos e facilidade de manuseamento até temperaturas de 100°C. As resinas epóxi representam o segundo tipo de matriz mais utilizado, apresentando um custo mais elevado, estas são caracterizadas por uma melhor resistência mecânica e resistência à humidade, baixa contracção durante a cura e uma maior faixa de temperatura de utilização, até cerca de 175°C. (3; 6)

As principais limitações na utilização de materiais compósitos de matriz polimérica distinguem-se pela limitação da temperatura de utilização, susceptibilidade à degradação ambiental, a baixa resistência mecânica transversal e altas tensões residuais existentes devido às grandes diferenças dos coeficientes de expansão térmica entre matriz e o reforço. Normalmente, estes materiais não podem ser utilizados em temperaturas próximas ou acima da temperatura de transição vítrea, na qual os polímeros perdem drasticamente as suas propriedades físicas.

Quando uma dada resina é combinada com fibras como material de reforço, tais como, vidro, carbono e aramida, são alcançadas propriedades excepcionais. A resina propaga a força que é aplicada sobre o compósito entre cada uma das fibras e protege as fibras contra a deterioração causada pela abrasão e pelo impacto. As principais aplicações das resinas poliéster remetem para as indústrias de construção, automóvel e da madeira. (7)

Os metais mais utilizados como matriz em compósitos são o magnésio, o alumínio, o titânio e as suas ligas. As principais razões na escolha de um metal para a matriz de um compósito remetem para uma larga faixa de temperatura de trabalho, uma boa resistência mecânica transversal, elevada tenacidade, resistência aos efeitos da humidade e uma maior capacidade de dissipação de calor, ou seja, uma boa condutividade térmica. Contudo, os metais são muito mais susceptíveis à degradação na interface reforço/matriz e à corrosão.

Por outro lado, os cerâmicos são escolhidos para matrizes por apresentarem uma larga faixa de temperatura de utilização, temperatura máxima superior a 2000°C, elevado módulo de elasticidade e baixa densidade. Porém, os cerâmicos apresentam uma grande desvantagem caracterizada por uma elevada fragilidade, o que leva a uma grande susceptibilidade à fractura. (3; 6)

Em suma, qualquer resina utilizada num material compósito requer boas propriedades mecânicas, propriedades de adesão, elevada tenacidade e boa resistência à degradação ambiental. É necessária uma boa adesão entre a resina e as fibras de reforço para assegurar que as forças estão distribuídas de forma eficiente e homogeneamente, o que previne a fractura ou o deslocamento da fibra/resina quando o material é submetido a um determinado esforço.

2.3. ARRANJOS GEOMÉTRICOS

A geometria e a orientação das fibras num material compósito são parâmetros com elevada importância, uma vez que, as fibras possuem propriedades mecânicas mais elevadas ao longo do seu comprimento comparativamente à sua largura. Este fenómeno remete para uma elevada anisotropia das propriedades dos compósitos. Contrariamente aos metais, as propriedades mecânicas dos materiais compósitos podem variar significativamente quando testadas em diferentes direcções. Posto isto, deve ser tida em consideração a força aplicada ao compósito e a sua direcção na fase de projecção da peça, de modo a optimizar o design da peça para o seu melhor desempenho.

A união geométrica do material de reforço e da matriz pode apresentar-se em três modelos diferentes. No primeiro o material de reforço particulado encontra-se disperso por toda a matriz, isto é, o reforço não é direccional. O segundo caso caracteriza-se por fibras curtas distribuídas aleatoriamente pela matriz, podendo existir porém uma certa orientação das mesmas e, consequentemente, uma direcção preferencial de reforço. O terceiro arranjo geométrico caracteriza-se por fibras longas distribuídas na matriz, normalmente, de forma orientada, com o objectivo de introduzir um reforço direccional. Na figura 1 encontram-se representados os modelos básicos dos diferentes tipos de arranjos geométricos entre o reforço e a matriz. Posteriormente, na tabela 2 destacam-se as principais formas de um material de reforço consoante o seu processamento e aplicação. (3)

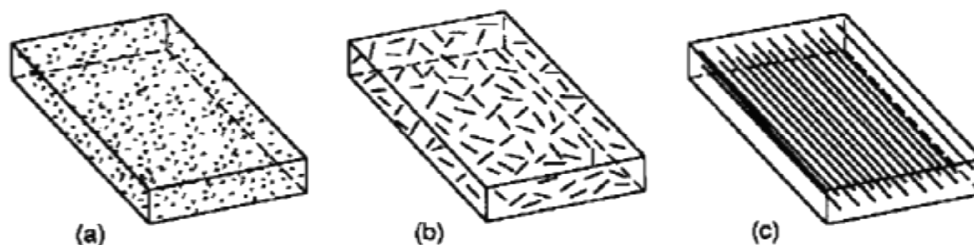


Figura 1 - Arranjos geométricos entre o reforço e a matriz. (a) particulado; (b) fibras curtas e (c) fibras longas. (2)

Tabela 2– Tabela representativa das diferentes formas do reforço de um material compósito. (3)

Formas	Descrição
Roving	O roving caracteriza-se por um cordão de filamentos contínuos enrolado helicoidalmente em bobines. Este arranjo é constituído por fibras com diâmetros da dezena de micrometros e destina-se à produção de fibras curtas, tecidos, mantas, entrançados, malhas ou híbridos.
Mantas	Nas mantas as fibras são distribuídas aleatoriamente e agregadas com um ligante em emulsão ou em pó que lhes confere estabilidade. Podemos ainda distinguir três tipos de mantas, as mantas de filamentos cortados com baixas propriedades mecânicas, as mantas de filamentos contínuos que promovem elevada conformabilidade e as mantas de superfície que se caracterizam pela sua leveza.
Tecidos 2D	Os tecidos caracterizam-se por ligações entre feixes de fibras longas. Os materiais compósitos em tecido possuem melhor resposta mecânica transversalmente ao plano das fibras comparativamente ao laminado unidireccional.
Malhas	Os reforços fabricados em malha são produzidos pela ligação sucessiva de camadas de fibras alinhadas. Este tipo de construção facilita a distribuição da carga pelas fibras, permitindo elevados módulos de tracção e flexão.
Tecidos 3D	Este tipo de tecidos é obtido por processos especiais de tecelagem que ligam múltiplas camadas de fibras com as mais variadas orientações. Esta tecnologia permite a confecção de formas para painéis e perfis com fins estruturais.
Entrelaçados	Os materiais compósitos entrelaçados, em geral, são mais caros do que as mantas, oferecendo uma resistência específica muito mais elevada. Este tipo de arranjo geométrico pode apresentar-se em configuração tubular ou plana.

2.4. DESIGN

O design de um componente é um desafio constante durante a sua fase de projecto. Um produto tem que satisfazer vários requisitos impostos pelo cliente, assegurando um nível de segurança, custo e funcionalidade. Os principais parâmetros a ter em conta durante a escolha do design de uma peça remetem ao custo de processamento, à resistência mecânica, à rigidez, ao peso, ao tamanho, à repetibilidade das peças, às restrições ambientais, à durabilidade e à manutenção. (6)

O custo versus benefício é usualmente o primeiro factor a ter em conta na escolha de um determinado design. Nesta análise os principais intervenientes são a escolha dos materiais, o tamanho do componente, o método de fabricação e o equipamento de processamento. O factor custo está associado a cada etapa do processo, por isso, também deve ser tido em conta o número de partes a ser produzidas, o seu tamanho, os constituintes dos materiais, os custos dos materiais auxiliares, os custos de energia, os desperdícios e as técnicas de processamento. (6)

O tamanho do componente é um parâmetro que influencia o processo de fabrico e a aplicação do compósito na montagem final. Uma grande vantagem dos materiais compósitos é a possibilidade de fabricar um componente individual de grandes dimensões, reduzindo, deste modo, o tempo de processamento, o tempo de projecto e as ligações existentes em múltiplas partes individuais de menor dimensão. A redução de juntas é um factor preponderante dado que resultam numa redução de material, de peso e de pontos de fractura. (6)

As propriedades mecânicas como a rigidez, a resistência e o peso são parâmetros que dependem dos materiais utilizados, das suas quantidades relativas e da sua localização. As interacções entre estas propriedades devem ser analisadas quando pretendemos projectar um novo design. Contrariamente aos materiais não compósitos, tais como os metais que exibem propriedades proporcionais, como a rigidez, a resistência e o peso, nos materiais compósitos isso não se verifica. Materiais de reforço como a fibra de vidro, aramida e de carbono, apresentam valores de resistência, rigidez e peso diferentes que não são proporcionais, o que faz da selecção do material compósito um verdadeiro desafio.

O nível de repetibilidade e de precisão pretendida de um produto final deve ser tido em especial atenção na fase de design inicial. A precisão de processamento pode ser, no entanto, alcançada com uma selecção de materiais adequada, assim como, uma selecção das ferramentas, uma sequência de laminagem e um controlo de processo. As ferramentas do molde requerem especial atenção para assegurar o elevado nível de precisão das peças após inúmeros ciclos de produção. A automatização do processo é uma grande vantagem ao nível da fabricação dos compósitos dado que mantém o nível de precisão e eleva a produtividade das peças. (6)

Os factores ambientais como a temperatura, humidade, corrosão por líquidos, entre outras degradações são também tidos em conta durante a fase de planeamento de design. O efeito da degradação ambiental na integridade mecânica de um material compósito é um parâmetro significativo. As considerações ambientais devem, portanto, ser analisadas em todas as fases do ciclo de vida de um compósito. (6; 9)

Em suma, os materiais compósitos oferecem uma vasta gama de flexibilidades para o designer. Contudo, as várias possibilidades oferecem múltiplas opções, nas quais se deve ter em conta que algumas combinações podem apresentar melhores funcionalidades, menores custos, facilidades de processamento, facilidades de reparo e manutenção e resistências ambientais mais elevadas. Dada a utilização muito difundida dos compósitos ser ainda recente existem muitas considerações relativamente ao uso e à combinação destes materiais que ainda não foram avaliadas, o que exige uma análise das aplicações existentes para a escolha da combinação que proporcionará melhores resultados.

2.5.PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

As propriedades finais dos materiais não se determinam apenas em função das suas características individuais, mas também do modo como os materiais são produzidos e da forma como são inseridos nesse compósito. Em todos os processos de fabricação de compósitos existentes, desde os que incorporam tecnologias mais simples às mais avançadas, existe um conjunto de limitações, nomeadamente, no que diz respeito à capacidade de produção das peças, tamanho, forma geométrica, qualidade estrutural, homogeneidade na produção, possibilidade de automatização e custo adicional.

Desde sempre os processos de fabricação de compósitos em molde aberto têm sido utilizados por várias empresas devido à sua facilidade de processamento e reduzido custo. Contudo, para processos de fabricação em grande escala para componentes de elevadas dimensões, tais como, as pás de turbinas eólicas ou cascos de barcos, foi necessária uma reestruturação e remodelação destes processos. A progressão natural dos processos em molde aberto para molde fechado promoveu um aumento da qualidade das peças, um maior controlo de processo e a eliminação da emissão de compostos. (10)

Ao longo das últimas décadas a produção de componentes tem evoluído de pequenos componentes até uma produção em massa com capacidade de fabricar peças de elevadas dimensões o que contribuiu para uma alteração significativa nas técnicas de fabricação, nomeadamente, promoveu a redução dos tempos de fabricação, optimização da relação custo/eficácia, elevada consistência do laminado e a redução dos impactos ambientais. (10)

Em seguida irão ser descritos os principais processos existentes de fabricação de materiais compósitos, desde os processos em molde aberto até aos processos mais recentes em molde fechado, abordando as respectivas vantagens e desvantagens de cada um.

LAMINAGEM POR PROJECCÃO

Na Laminagem por Projecção ou “Spray lay-up” a fibra é projectada já impregnada numa resina catalisada através de uma pistola de mão, directamente para o molde, como representa a Figura 2. Os materiais depositados são deixados a curar em condições atmosféricas normais. Neste processo as fibras são inseridas de forma aleatória e, consequentemente, as propriedades mecânicas são limitadas pela contracção das fibras descontínuas e pela orientação aleatória das fibras. Os produtos tendem a ser ricos em resina e apresentam baixas propriedades mecânicas devido à utilização de fibras curtas. (7)

A combinação da fibra e da resina na pistola de spray permite alcançar uma excelente impregnação das fibras e reduzir os vazios e as bolhas antes da cura da resina. Este processo apresenta vantagens como o baixo custo de equipamentos e materiais, taxas de deposição elevadas, baixos custos de mão-de-obra comparativamente à laminagem manual, versatilidade na forma dos componentes e na configuração do laminado e, ainda, um elevado potencial para automação do processo. Por outro lado, este processo apresenta alguns inconvenientes, nomeadamente, riscos de saúde e segurança, elevados custos de extracção de compostos orgânicos voláteis, reduzida taxa de produção, influência do trabalhador na qualidade do produto, dificuldade de remoção de ar aprisionado no molde, inconsistência dimensional, elevado desperdício de matéria-prima, excesso de resina nos laminados e elevada viscosidade da resina para que possa ser introduzida na pistola de spray. (7; 11)

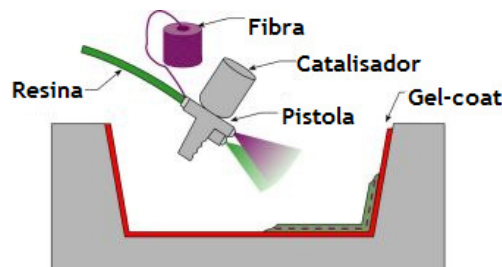


Figura 2 - Esquema representativo do processo de Laminagem por Projecção. (11)

LAMINAGEM MANUAL

A Laminagem Manual ou “Hand lay-up” é um dos processos mais largamente utilizados, embora não represente o de maior produção devido à sua principal limitação, a cadência de produção. Neste processo as fibras são colocadas no interior do molde e a resina é introduzida e impregnada à mão com o auxílio de rolos. As escovas são utilizadas para distribuir a resina uniformemente ao longo das fibras e os rolos são empregues para extrair as bolhas de ar do reforço e, ainda, para assegurar a completa impregnação das fibras na resina. O laminado é deixado a curar nas condições atmosféricas normais, sem a aplicação de pressão ao molde para a sua consolidação e, após a cura, a peça é retirada do molde com a forma final desejada. (7)

Este processo manual apresenta inúmeras vantagens, tais como, o baixo custo de equipamentos, materiais relativamente baratos, vasta escolha de fornecedores e tipos de materiais, versatilidade na forma, no tamanho e na configuração dos laminados, elevadas frações do volume de fibra comparativamente ao “Spray lay-up”, produção de compósitos ricos em resina que contribuem para uma elevada resistência à corrosão, capacidade de incorporação de insertos e obtenção de produtos com boas propriedades físicas e mecânicas. Contudo, as desvantagens deste processo impõem limitações ao seu desenvolvimento, nomeadamente, riscos de saúde e segurança, elevados custos de extracção de compostos orgânicos voláteis, influência do trabalhador na qualidade do produto, baixas taxas de produção devido aos tempos de cura à temperatura ambiental, elevada viscosidade da resina para que possa ser manuseável, inconsistência dimensional, elevada quantidade de vazios e uma reduzida fracção de volume de fibra. (7; 11)

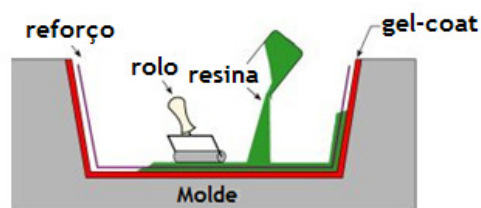


Figura 3 - Esquema representativo do processo de Laminação Manual (11)

LAMINAGEM A VÁCUO

O processo Laminagem a Vácuo ou “Vacuum Bagging” é uma extensão do processo de Hand Lay-up, com a aplicação de pressão no laminado para melhorar a consolidação e extrair o excesso de resina e o ar incorporado no laminado. Neste processo o laminado embebido é selado com um plástico contra o molde, posteriormente, o ar é extraído do interior do saco com o auxílio de uma bomba de vácuo, o que contribui para a consolidação da estrutura. (7)

As principais vantagens deste processo remetem para a elevada fracção de volume de fibra que se pode alcançar, baixa quantidade de espaços vazios, elevada impregnação das fibras e elevadas propriedades mecânicas. Contudo, as principais desvantagens remetem para os elevados riscos de saúde e segurança, custos de extracção e tratamento dos compostos orgânicos voláteis, mão-de-obra adicional, influência do trabalhador na qualidade do produto, reduzida taxa de produção, inconsistência dimensional, custos adicionais de equipamento e ferramentas, compatibilidade dos materiais com o sistema de resina, e uma elevada quantidade de desperdício dos materiais, especialmente, os consumíveis. (7; 11)

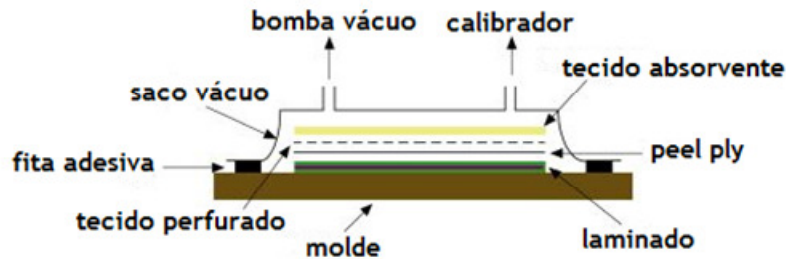


Figura 4 - Esquema representativo do processo de Laminação a Vácuo. (11)

ENROLAMENTO FILAMENTAR

O Enrolamento Filamentar ou “Filament Winding” é um processo automatizado utilizado para fabricar estruturas circulares de material compósito com espaços vazios ou com secções ovais, como tubulações e tanques. Neste processo a introdução das fibras com diferentes orientações é controlada pelo sistema de alimentação e pela velocidade de rotação do rolo. Antes de serem processadas as fibras são embebidas num banho de resina e posteriormente são enroladas num mandril com a forma final da estrutura. Quando se alcança o número de camadas requerido o componente enrolado é curado e o mandril é removido caso não faça parte da estrutura final. (11)

As principais vantagens deste processo são o seu baixo custo, elevada exactidão e repetibilidade na colocação das fibras, capacidade de utilização de fibras contínuas em toda a área do componente e facilidade de orientação das fibras na direcção da força, elevada fracção de volume de fibra e elevada redução de custos na produção de grandes quantidades. Por outro lado, este processo apresenta algumas desvantagens, nomeadamente, os custos e a complexidade dos mandris, necessidade de um componente adicional par remover o mandril, limitação a componentes com formas convexas, mau acabamento superficial e dificuldade na alteração da orientação das fibras. (6; 11)

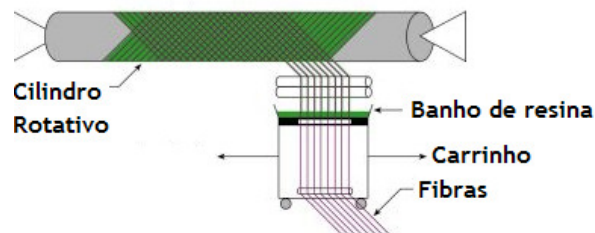


Figura 5 - Esquema representativo do processo de Enrolamento Filamentar. (11)

PULTRUSÃO

A Pultrusão ou “Pultrusion” é um processo automatizado para a fabricação contínua de perfis de materiais compósitos de secção constante e elevado desempenho. Neste processo as fibras são puxadas de forma a serem colocados no laminado na configuração desejada, passando por um banho de resina e, posteriormente, por um sistema aquecedor no qual se completa a impregnação de resina, se controla a quantidade de resina e se cura o material na sua forma final. As propriedades estruturais dos laminados são de boa qualidade e a impregnação de resina pode ser feita em processo fechado, minimizando as emissões de compostos voláteis. Contudo, este processo acarreta custos elevados de maquinaria e sistemas de aquecimento. (11)

As principais vantagens deste processo remetem para uma excelente relação resistência/peso, resistência à corrosão, isolamento eléctrica, estabilidade dimensional, elevada fracção de volume de fibra, possibilidade de fabricação de formas complexas com pequenas espessuras, possibilidade de incorporação de insertos e baixo custo de ferramentas. Contrariamente, o processo também apresenta desvantagens, como, limitação a componentes de secção constante ou quase constante e o elevado custo de aquecimento das fibras. (6; 11)

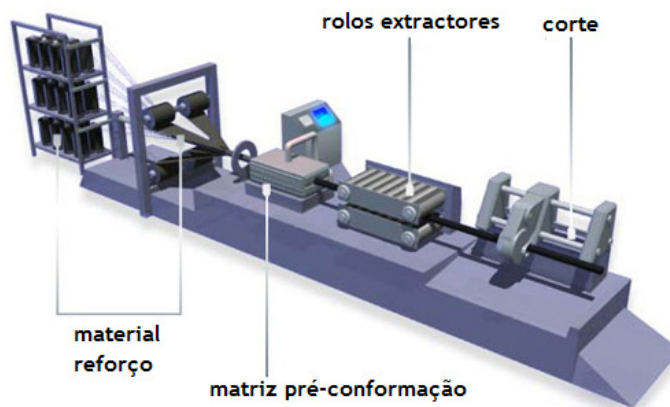


Figura 6 - Esquema representativo do processo de Pultrusão. (11)

MOLDAÇÃO POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA

No processo de Moldação por Transferência de Resina ou “Resin Transfer Moulding” (RTM) o material de reforço é colocado no interior da cavidade do molde e, de seguida, um segundo molde é colocado sobre o primeiro e a resina é injectada a baixa pressão para o interior da cavidade existente entre eles. Quando as fibras se encontram embebidas em resina na sua totalidade, os canais de entrada são selados e o laminado é deixado a curar. (6)

O processo possui a vantagem de produzir um laminado com elevado teor de fibra, número de vazios reduzido e ainda elevada qualidade superficial em ambos os lados da peça. Para além destas vantagens este processo permite a redução/emissão de compostos orgânicos voláteis, baixo custo de produção, baixo custo de materiais, reduzida porosidade, espessura uniforme e ainda capacidade de automação parcial. Por outro lado, o processo RTM também apresenta desvantagens, principalmente, quanto ao elevado custo de investimento, dificuldade em projectar moldes e ferramentas auxiliares, dificuldade em prever o fluxo de enchimento, elevado número de peças rejeitadas, limitação dimensional, baixa viscosidade da resina e necessidade de bastante mão-de-obra. (6; 11)

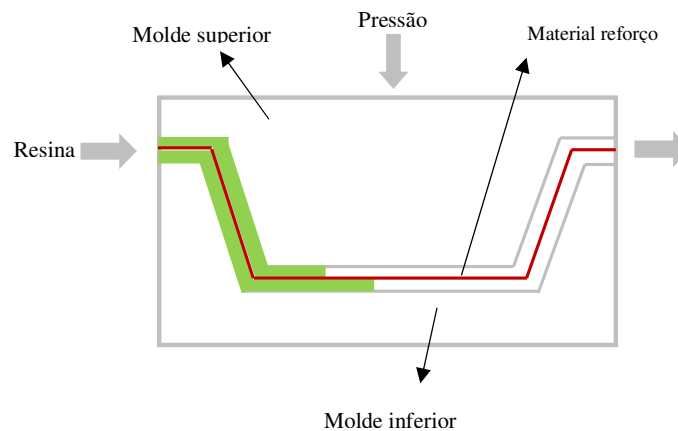


Figura 7 - Esquema representativo do processo de Moldação por Transferência de Resina. (11)

AUTOCLAVE

O processo de moldação em Autoclave consiste em consolidar um componente pré-formado através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo. Numa primeira fase este processo procura reduzir a viscosidade da resina para promover a eliminação de compostos orgânicos voláteis e aumentar o fluxo de resina de modo a garantir elevados teores de fibra. Posteriormente, numa segunda fase inicia-se a cura e a consolidação do componente, durante a qual a pressão é um parâmetro crucial. Caso não sejam usados pré-impregnados, a boa impregnação do reforço será também um objectivo fundamental. (3)

A moldação em autoclave permite a produção de peças de grandes dimensões e geometria complexa, com elevada qualidade e excelentes propriedades mecânicas, devido à elevada fracção volúmica do reforço. Este processo é adequado para o fabrico de pequenas séries de componentes sujeitos aos mais exigentes requisitos de desempenho mecânico e qualidade. As suas principais desvantagens são o forte investimento inicial e a morosidade na moldação que torna o processo inadequado para a produção em série. (3)



Figura 8 - Fotografia representativa do processo Autoclave. (11)

2.6. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS

O início do desenvolvimento e da aplicação mais vasta dos materiais compósitos foi incentivado pelo seu elevado potencial para estruturas de menor peso. As suas primeiras aplicações, na década de 1960, desenvolveram-se no sector aeroespacial, onde o peso é o principal factor que influencia significativamente o consumo de combustível, o desempenho e a quantidade de material utilizado. Hoje em dia, frequentemente, recorre-se ao uso dos materiais compósitos devido a uma série de propriedades incluindo baixo peso, alta resistência, baixa condutividade eléctrica, baixa expansão térmica, baixa taxa de transferência de calor, resistência à corrosão, resistência à fadiga, manutenção reduzida e ainda a capacidade de fabricar materiais na sua forma final de aplicação. (3)

No entanto, as propriedades dos materiais compósitos podem ser alteradas de acordo com o tipo de material de reforço, o tipo de matriz, os teores de matriz e de reforço e ainda consoante a geometria da união entre o reforço e a matriz. Os altos valores encontrados da razão resistência mecânica/peso destacam-se entre as vantagens dos compósitos fibrosos de matrizes poliméricas, quando comparados com os materiais de engenharia convencionais. Esta excelente razão resistência/peso dos materiais compósitos possibilitou a obtenção de componentes mais leves que levaram a uma melhoria no desempenho na indústria dos transportes. (2)

A estrutura heterogénea dos compósitos promove uma resistência à fadiga mais elevada do que os materiais homogéneos tradicionais. As heterogeneidades funcionam como barreiras para a propagação de fissuras, originadas quando o material está submetido a um determinado número de ciclos de fadiga, alterando as suas direcções de propagação e retardando o seu crescimento. A elevada resistência à fadiga dos materiais compósitos face a materiais convencionais associada ao seu baixo peso estrutural justifica a elevada utilização destes materiais na indústria aeroespacial. (2)

A grande maioria das estruturas em engenharia são submetidas a mudanças de temperatura ao longo do seu tempo de vida, o que origina deformações, estas deformações podem originar mudanças no tamanho, na forma, no atrito e nas tensões instaladas nas peças. Praticamente em todas as aplicações estas alterações físicas podem ser críticas. Os materiais compósitos também são vantajosos nestas aplicações porque comportam um coeficiente de expansão térmica próximo de zero ou nulo, quando são projectados num design favorável à minimização das tensões de origem térmica. (6)

Os materiais compósitos de matriz polimérica também têm sido seleccionados devido à sua resistência à corrosão. A maioria das aplicações dos compósitos de fibra de vidro têm sido direccionadas para estruturas expostas a ambientes muito agressivos. Estes materiais, geralmente, também possuem uma elevada resistência ao impacto devido à sua estrutura heterogénea. Durante um impacto ocorre uma difusão de energia nas várias fases do compósito contribuindo, deste modo, para uma redução da energia inicial de impacto, diminuindo a severidade dos efeitos no material. (2)

Um dos principais factores que levou à preferência pelos materiais compósitos no sector aeroespacial, automóvel e desportivo foi a redução de peso destes componentes. Em algumas aplicações esta vantagem traduz-se numa redução do consumo de combustível, assegurando o elevado desempenho e resistência que comportavam os materiais convencionais, contribuindo para uma diminuição dos custos de utilização e redução dos impactos ambientais. (2)

2.7.ADESÃO DE LIGAÇÕES

A utilização de materiais compósitos em estruturas exige, frequentemente, o estabelecimento de ligações entre diferentes componentes. Estas ligações, normalmente designadas por juntas, podem ser estabelecidas entre dois componentes de um material compósito, ou entre um material compósito e um material metálico. A condição necessária para que uma ligação seja eficiente é a existência de transferência de força entre os dois componentes, assegurando a sua total integridade estrutural quando submetidos à acção de forças e a variações das condições ambientais. As juntas também podem ser utilizadas na reparação de componentes mas, geralmente, as juntas implicam um aumento de peso da estrutura, originam problemas de fabrico na sua execução, constituem zonas de potencial colapso da estrutura e encarecem o produto final. Deste modo, o projectista deve restringir ao máximo a sua utilização. (12; 13)

As duas principais classes de ligações são as ligações por adesivos, como é possível observar na Figura 9, e as ligações aparafusadas, representadas na Figura 10, estas podem ainda ser combinadas como representa a Figura 11. Os compósitos reforçados por fibras apresentam uma grande susceptibilidade a problemas de ligação comparativamente aos materiais metálicos, devido à baixa resistência ao corte, tensão transversal e corte interlaminar. (2)

A utilização de adesivos em substituição dos tradicionais fixadores tornou-se cada vez mais popular no desenvolvimento de novos designs. Os adesivos são materiais de eleição para muitas aplicações, porque permitem a produção de estruturas de baixo peso, reduzem a concentração de tensões, podem ser usados em ligações de materiais dissimilares e oferecem preços reduzidos. Estes adesivos também promovem uma elevada área de contacto, comparativamente, às juntas soldadas e com isso asseguram uma melhor distribuição de tensões. Contudo, apesar das ligações adesivas prevenirem o problema da concentração de tensões causadas por perfurações, a distribuição de tensões não é uniforme e a funcionalidade destes adesivos quando submetidos à aplicação de uma força depende de alguns parâmetros, tais como, a temperatura, a humidade, a concentração de tensões, a quantidade de deformação e as condições ambientais. (7; 14)

As aplicações mais comuns destes adesivos focam-se na indústria das embalagens, da madeira e mobiliário, do calçado e em aplicações mais exigentes, como a indústria aeronáutica. A principal vantagem deste tipo de ligação comparativamente às juntas com perfurações caracteriza-se por uma melhor distribuição da carga proporcionando um melhor desempenho sob solicitações de fadiga. Além disto, estas ligações permitem obter uma elevada economia de peso, facilidade na união de superfícies irregulares e a sua execução decorre segundo um processo mais rápido, simples e fácil de automatizar. Em contrapartida, as ligações com adesivos apresentam alguns inconvenientes, tais como, a necessidade de limpeza e tratamento prévio das superfícies para uma melhor adesão, os longos tempos de cura que requerem a aplicação de temperatura e pressão, a elevada sensibilidade a factores ambientais, o mau desempenho sobre solicitações de arrancamento e, acima de tudo, o risco de saúde associados à toxicidade e à segurança derivado da inflamabilidade da maioria dos adesivos. (12)

Os adesivos são classificados segundo vários critérios, nomeadamente, de acordo com a sua estrutura molecular, a sua origem, o processo de endurecimento utilizado e o seu desempenho. Quanto ao seu desempenho, os adesivos podem ser classificados em estruturais e não-estruturais. Em oposição aos produtos de revestimento ou de estanquicidade, os adesivos devem apresentar uma resistência equivalente aos materiais constituintes da estrutura onde estão a ser aplicados. (3)

Os modos de rotura das juntas coladas de materiais compósitos podem-se caracterizar em rotura coesiva, quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, rotura adesiva, quando existe rotura do adesivo e por fim rotura do substrato. (3; 7)

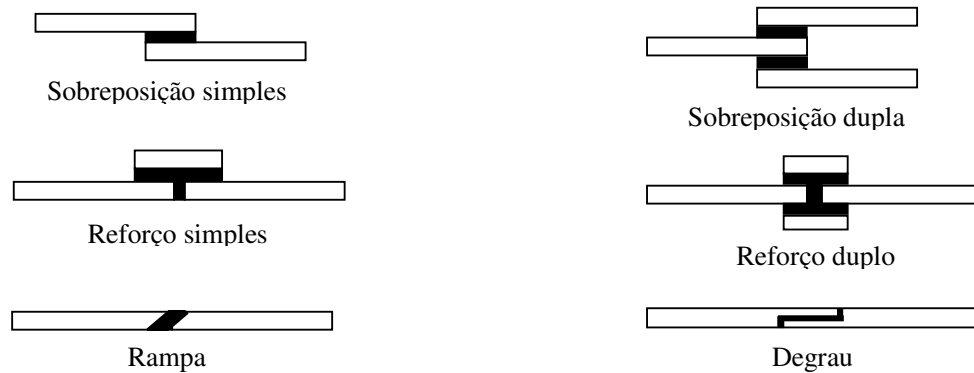


Figura 9 - Principais ligações entre materiais compósitos com a utilização de adesivos. (3)

Relativamente às ligações aparafusadas, os principais modos de falha resumem-se à fractura do material quando submetido a uma força na direcção do alongamento, fractura por tensão do material na área de secção reduzida ao longo da zona aparafusada, fractura por corte ou clivagem do material e fractura do parafuso. Uma das alternativas para aumentar a resistência destas ligações é recorrer ao uso de insertos metálicos ou reforçar uma secção do compósito tal como se observa na figura seguinte. As falhas por tensão podem ser evitadas ou mesmo eliminadas aumentando a flexibilidade da ligação e contribuindo para a propagação da transferência de força. Geralmente, os compósitos apresentam uma maior fragilidade relativamente aos materiais metálicos, dificultando a redistribuição da força ao longo de secções em zonas aparafusadas e, simultaneamente, provocando efeitos de corte causados pelas fibras descontínuas que originam problemas de design complexos. (2; 7)

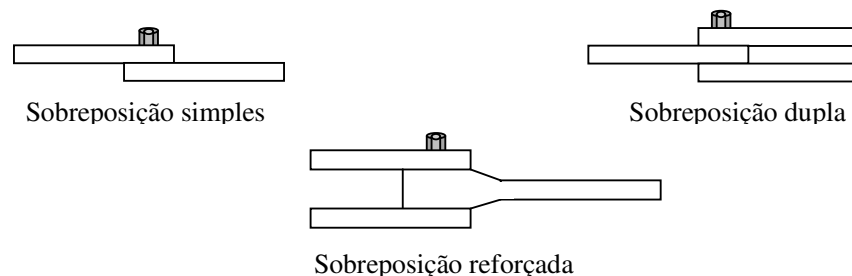
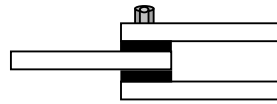


Figura 10 - Principais ligações entre materiais compósitos com a utilização de parafusos. (2)

As ligações que incorporam simultaneamente adesivos e parafusos apresentam, geralmente, um melhor desempenho que as anteriores. Os adesivos contribuem para uma redução na tendência usual ao corte das ligações aparafusadas. Os parafusos diminuem a probabilidade da ligação com adesivo se separar segundo o modo de corte interfacial. As ligações com um adesivo e um parafuso apresentam uma boa distribuição da força e estão geralmente projectadas para que todos os parafusos fiquem submetidos à mesma força, após a falha no adesivo. (2)



Sobreposição dupla

Figura 11 - Principais ligações entre materiais compósitos com a utilização de adesivos e parafusos. (2)

A durabilidade e a estabilidade de uma ligação pode derivar da resistência à fadiga que lhe está associada, no entanto, a resistência aos impactos ambientais adquire uma maior importância no tempo de ciclo de vida. A resistência ambiental de uma ligação adesiva é determinada pelas ligações químicas que se formam durante a cura do adesivo e da resistência dessas ligações químicas à degradação ambiental. A grande maioria das causas de falha de um componente em serviço está relacionada com a degradação ambiental da interface. Para contornar este problema recorre-se aos tratamentos superficiais, representando um factor determinante para o desempenho ao nível ambiental de uma ligação. (9; 13)

3. PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO

3.1.O PROCESSO

O rápido crescimento da indústria dos compósitos e o esforço contínuo para produzir componentes rígidos, leves e de rápido fabrico promoveu o uso de técnicas de pressão para consolidar e formar materiais com excelentes propriedades mecânicas. Um dos principais óbices à inserção da área dos compósitos no mercado é o elevado custo que está associado a algumas tecnologias de fabricação destes materiais, tal como, o processamento em Autoclave. Em resposta a estes desafios têm-se destacado processos de moldação líquida de compósitos, tais como, o RTM e o VIP. Contudo, apesar da sua popularidade, o processo de RTM continua a exigir grandes investimentos, uma vez que utiliza moldes muito pesados e complexos com capacidade de suportar a pressão de injeção em peças de grandes dimensões, o que conduz a elevados custos de produção. O VIP promove a obtenção de um laminado robusto, de elevada qualidade e com uma reduzida quantidade de imperfeições. Como em qualquer outro processo de fabricação de compósitos, o planeamento do seu desenvolvimento e os cuidados durante a manufatura são factores críticos para o sucesso do processo. (15)

Actualmente, a indústria dos materiais compósitos enfrenta uma grande quantidade de desafios, onde as regulamentações ambientais, cada vez mais, exigentes limitam a exposição dos trabalhadores a compostos orgânicos voláteis, o que contribui para um decréscimo da competitividade de muitas tecnologias existentes, tais como, a Laminagem Manual e a Laminagem por Projecção, processos que produzem peças em molde aberto e, tipicamente, utilizam o estireno como solvente reactivo, em percentagens entre 30% a 45%, para reduzir a viscosidade da resina e ainda para interligar as moléculas de poliéster na cura, transformando dessa maneira a resina de líquido em sólido. Deste modo, este reagente exige que haja uma boa ventilação e equipamento de protecção adequado para os trabalhadores durante o processo de fabricação. (6; 16; 17)

O Processo de Infusão a Vácuo, esquematicamente apresentado na figura 12, é uma técnica recente de injeção de resina sob pressão, em molde fechado, para a produção de compósitos, com elevada potencialidade na fabricação de peças com forma simples, em pequena série e com baixos custos de produção. Esta técnica é simples e fácil de executar e consiste nas seguintes etapas de processamento: (i) colocação do material de reforço no interior do molde, (ii) introdução da resina no interior do molde, (iii) cura da resina e (iv) abertura do molde e desmoldação da peça. (6; 18)

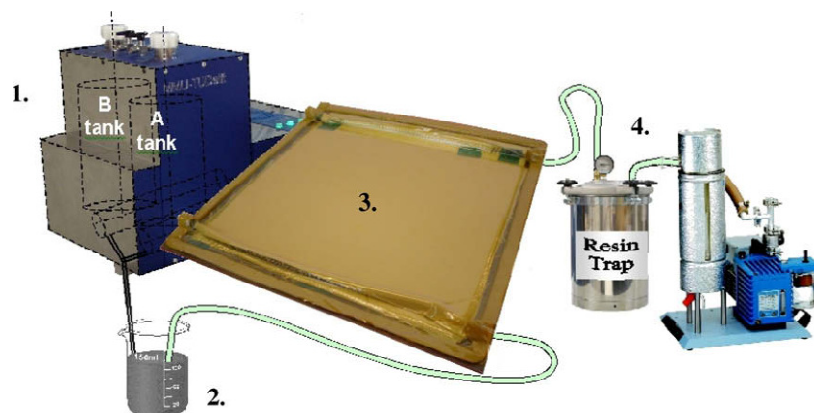


Figura 12 - Representação esquemática do processo de infusão a vácuo. (1) Equipamento de mistura para a fabricação de resina, (2) Recipiente de resina, (3) Molde e (4) Sistema de controlo de pressão e recipiente intermédio para o excesso de resina. (18)

Enquanto num processo típico de Laminagem Manual os reforços são colocados sobre o molde, a resina é impregnada manualmente com o auxílio de escovas ou rolos e o vácuo é apenas usado no final para remover o excesso de resina, no VIP os materiais são submetidos à pressão de vácuo enquanto ainda estão no estado seco, sendo este a força motora que suga a resina para o interior do molde, por meio de tubos estrategicamente posicionados. No final, qualquer excesso de resina que entra no interior do laminado é conduzido até um recipiente intermédio, colocado entre o laminado e a bomba de vácuo, sendo posteriormente retirado após a finalização da infusão. Como resultado, é apenas introduzida uma quantidade mínima de resina, o que origina uma redução de peso do compósito, um aumento da rigidez e uma maximização das propriedades da fibra e da resina. (6)

O processo de infusão caracteriza-se por um escoamento de resina, proveniente de um recipiente, desde os canais de entrada no laminado até aos canais de saída, que conduzem a um recipiente intermédio. A principal dificuldade encontrada durante o planeamento do processo de infusão remete para o tamanho, a forma e o tipo de laminado que se pretende fabricar, o que requer uma diferente disposição dos canais para cada formato de peça, para permitir o escoamento completo por todo o laminado, sem que ocorra desfasamento da progressão do fluído nem solidificação da resina injectada antes da infusão estar completa.

Idealmente, no VIP o fluxo de resina deve assegurar que a resina injectada alcance todo o laminado fibroso antes do início da cura ou da chegada ao orifício de saída. No processo RTM, o orifício de saída é, normalmente, aberto para a atmosfera, o pré-formado é mantido à pressão atmosférica e a resina é injectada para o interior dos moldes. Esta pressão de injeção necessita de uma adequada estabilidade do molde recorrendo ao auxílio de ferramentas rígidas. Contudo, o elevado custo das ferramentas e do equipamento limita a adequação deste processo para componentes de maiores dimensões. Contrariamente, no VIP o orifício exterior está conectado a uma bomba de vácuo. Esta bomba suga o ar do interior, originando uma pressão negativa que conduz a resina para o interior do laminado. Esta pressão negativa permite, ainda, que a metade superior do molde seja feita de um material flexível, por exemplo um saco de plástico, reduzindo os custos de investimento neste processo e não impondo nenhuma limitação no tamanho das peças. (6)

O fluxo de resina é um parâmetro fundamental neste processo cuja previsão pode ser feita com o auxílio da Lei de Darcy, designada por:

$$v = K \times i$$

Onde v = velocidade, K = constante de permeabilidade e I = gradiente hidráulico. Através da análise da lei de Darcy podemos concluir que, quanto maior for a diferença de pressão do interior do molde para o exterior maior a velocidade de enchimento do molde, quanto menor a viscosidade da resina menor será o tempo de enchimento e, também, quanto maior for a permeabilidade do meio mais rápido será o enchimento do molde. No VIP a pressão alcançada durante o decorrer do processo de infusão pode variar de 2 a 40 kPa (20 a 400 mbar), o que resulta numa diferença de pressão entre o interior e o exterior entre 60 e 98 kPa (600 e 980 mbar). (6)

A permeabilidade do meio é uma propriedade do material de reforço que caracteriza a facilidade com que a resina flui ao longo do material. Este parâmetro é geralmente considerado uma constante na Lei de Darcy, mas pode ser experimentalmente determinado. A permeabilidade é uma característica fortemente influenciada pela fracção volúmica de fibra existente no compósito, isto é, o nível de compressão durante a infusão a vácuo. Em suma, podemos inferir que a permeabilidade do reforço apresenta um grande impacto no tempo de enchimento do componente e quanto maior for o seu valor mais rápida será a velocidade de enchimento do molde. (6; 16)

A estratégia de injeção que define a localização dos canais de entrada e saída de resina é uma variável com elevada importância, uma vez que, influencia significativamente o tempo de enchimento do molde. A definição da melhor estratégia para atingir o menor tempo de enchimento pode ser desenvolvida através de um software de simulação que caracteriza o fluxo de resina num dado meio. Podemos deduzir que os parâmetros que definem a estratégia de injeção caracterizam-se pela distância de injeção da resina e pela relação existente entre o comprimento do canal de injeção e o comprimento da frente de fluxo. No entanto, para além de um bom tempo de enchimento do molde, a principal preocupação durante a definição da estratégia de injeção é o preenchimento de todos os espaços livres existentes no material de reforço, para não originar um laminado com pontos secos que são pontos fracos do material que levarão à fractura. A figura seguinte representa alguns exemplos de estratégias de injeção no processo de infusão a vácuo. (6)

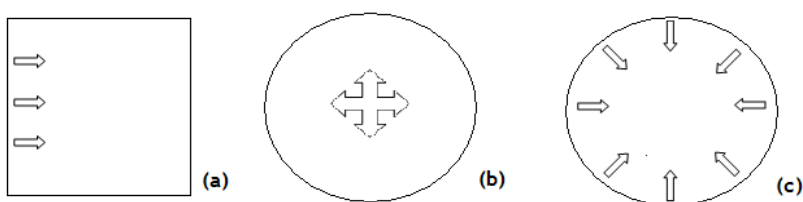


Figura 13 - Representação esquemática de estratégias de injeção: (a) Injeção lateral, (b) Injeção pontual, (c) Injeção circunferencial. (6)

Em suma, o VIP é uma das tecnologias preferenciais para a produção de estruturas com grandes dimensões, em pequena série, onde o vácuo é a única força de condução para impregnar a cavidade do molde do pré-formado. Este processo apresenta inúmeras vantagens face a outras tecnologias semelhantes, nomeadamente, um elevado conteúdo de fibra, na ordem de 60% a 70% do seu peso, contra a grande maioria dos processos em molde aberto, com percentagens na ordem dos 45%, e ainda baixa porosidade, inferior a 1%, promovendo uma maior resistência aos componentes, comparativamente aos que são produzidos em molde aberto, no caso de terem a mesma espessura. Outra grande vantagem do VIP é a elevada eficiência de impregnação de resina no pré-formado, o que permite obter uma infusão simultânea nas três direcções. (6)

Este processo é utilizado para fabricar compósitos de largas dimensões, particularmente na indústria aeroespacial, automóvel e naval. O vácuo é utilizado por duas razões, em primeiro lugar destina-se a compactar o pré-formado e em segundo conduz a resina termoendurecível desde o reservatório até à cavidade do molde para encher os espaços vazios entre as fibras e o pré-formado. O sistema de resina é usualmente desenhado, para que o tempo de consolidação seja ligeiramente maior que o tempo de enchimento do molde para assegurar o enchimento completo do molde. O design do molde é também um factor crítico para o alcance do enchimento completo do molde, eliminando os espaços livres de nível macro e microscópico, que representam lugares secos na peça. (6; 19)

3.2. VANTAGENS E INCONVENIENTES DO VIP

O processo de infusão a vácuo oferece um grande número de benefícios face às tradicionais tecnologias existentes. As peças produzidas por infusão a vácuo caracterizam-se por uma excelente razão fibra/resina, elevada qualidade superficial, rapidez de processamento e facilidade de preparação e manuseamento dos materiais. Como já referido, o grande impulso do desenvolvimento desta tecnologia foi a eliminação/redução da emissão de compostos orgânicos voláteis como o estireno para o meio ambiente, surgindo como uma alternativa às tradicionais tecnologias de Laminagem Manual e Laminagem por Projecção. Além da redução das emissões de poluentes, este processo integra vários benefícios, nomeadamente, uma elevada qualidade de consistência dos produtos e estabilidade dimensional, o que permitiu que fosse adoptado para a indústria de materiais compósitos avançados. (20; 21; 22)

As propriedades mecânicas dos laminados sofreram alterações significativas com a substituição de processos de molde aberto pela técnica de infusão de resina, esta vantagem caracteriza-se por uma redução da espessura dos componentes em toda a sua expansão, até cerca de 30% em algumas aplicações. Para além destas vantagens, esta tecnologia permite ainda estimar a distribuição de espessura no produto final e alterar a configuração do fabricado e dos canais de entrada para que possamos obter a espessura desejada nas diferentes áreas de secção. Adicionalmente, por meio de simulações ao nível computacional, o tempo de enchimento do molde pode também ser calculado e, consequentemente, o tempo de cura da resina pode ser optimizado para reduzir o tempo total de fabricação do componente e diminuir os custos de produção. (19; 23)

A escolha da tecnologia de fabrico com melhor relação custo/eficiência para um determinado componente deve ser tida em especial consideração, uma vez que, é necessário definir especificamente critérios e parâmetros de selecção de processos de fabricação de compósitos. Entre estes critérios destacam-se o número de peças que se pretende produzir, o tamanho e a geometria da peça, o desempenho pretendido, ou seja, a rigidez e a resistência por unidade de peso e ainda o acabamento superficial exigido. Idealmente, o design, o material e a técnica de fabrico devem ser seleccionados e optimizados para a obtenção de uma relação desempenho/custo mais vantajosa.

Como qualquer outro processo de fabricação de laminados, o processo de infusão a vácuo também apresenta alguns inconvenientes. Apesar de se caracterizar como um processo simples e de fácil processamento, este processo requer a definição de um design específico e detalhado em cada produto diferente, com o principal objectivo de reduzir o tempo de produção, sem a criação de vazios no interior de componente, que representam pontos fracos e contribuem para a fragilidade do laminado. Por outro lado, a velocidade do processo representa um parâmetro fulcral a ter em consideração, porque determina o tempo de fabricação das peças e influencia o seu custo de produção. Este factor que depende, substancialmente, da viscosidade da resina injectada, da distância percorrida pela resina ao longo de todo o laminado, da permeabilidade do meio e ainda do valor de vácuo introduzido no molde. (6; 24)

O processo apresenta ainda uma limitação no tamanho das peças, sendo mais viável a sua aplicação em componentes com grandes dimensões e sem formas complexas promovendo assim um baixo investimento e uma excelente rentabilidade. Geralmente, o VIP não apresenta quaisquer limitações de geometria, podendo ser fabricadas estruturas tridimensionais e partes ocas. No entanto, a existência de demasiados detalhes na geometria das peças pode originar problemas como arestas vivas que dificultam o fluxo de resina e ainda variações significativas de espessura. A sua taxa de produção é reduzida devido à preparação minuciosa que é necessária a este processo. Para além destes parâmetros, este processo não permite a produção de peças com moldes em dois lados do componente, devido à existência de um molde flexível (saco de vácuo) de um dos lados. Por fim, uma característica muito importante e talvez o parâmetro mais crítico deste processo, é a existência de fugas durante a infusão, que resulta na entrada de ar para o interior do molde originando espaços vazios no componente após a cura, que constituem os principais pontos de fractura. Os vazios são indesejáveis nos materiais compósitos devido aos seus efeitos sobre as propriedades mecânicas, propriedades dieléctricas e acabamento superficial. Estas fugas podem, no entanto, ser prevenidas antes da infusão através da utilização de um detector ultra sónico que nos permite identificar possíveis zonas onde existem fugas de ar. (6; 25)

Um dos principais inconvenientes deste processo, que leva a que muitos produtores recuem na sua implementação, remete para a qualidade superficial das peças, afectada pelo efeito de contracção da resina durante a fase de cura. Uma das formas mais eficaz para contornar este problema é através da aplicação de um revestimento superficial utilizado para bloquear a impressão da fibra através da superfície do laminado. Contudo este método contribui para o aumento do nível de compostos orgânicos voláteis libertados para a atmosférica e ainda representa mais uma etapa no desenvolvimento do processo, alargando o tempo de produção e aumentando os custos. (21; 26)

Em suma, podemos inferir que a escolha de um processo de fabricação de laminados não é simples nem imediata, cada peça exige uma análise detalhada das suas características, nomeadamente, do seu design, dos materiais utilizados, da espessura pretendida e da sua aplicação no mercado. Após a análise da estrutura da peça é necessário escolher o processo mais adequado, mais favorável e mais vantajoso para a sua produção, uma vez que, não é possível produzir todas as peças com o mesmo processo de fabrico, devido a limitações do design ou da aplicação da peça que comprometem a sua produção.

3.2.1. VIP VERSUS RTM

Os processos de infusão de resina representam técnicas de produção de materiais compósitos que permitem a fabricação de estruturas de elevadas dimensões e com elevadas propriedades mecânicas. Contudo, ambas as técnicas são geralmente utilizadas para alcançar a redução de custos comparativamente às tradicionais técnicas de laminagem manual ou autoclave, aumentar as propriedades mecânicas com o elevado volume de fibra e a reduzida quantidade de vazios e contribuir para uma melhoria a nível ambiental prevenindo as emissões de estireno. (27)

O processo RTM é um dos principais concorrentes do processo de infusão a vácuo dado que permite a produção de peças em material compósito através da técnica de injeção de resina, originando um produto consistente com elevadas propriedades mecânicas, sem a emissão de poluentes orgânicos para o meio ambiente. O processo de infusão a vácuo é derivado do RTM, ambos abrangem áreas de aplicabilidade coincidentes e de certo modo as tecnologias também se equiparam. O equipamento e o método de aplicação do gradiente de pressão determinam a técnica de fabrico. A selecção do equipamento está fortemente relacionada com o volume de produção e com o tamanho da peça que se pretende produzir, enquanto o método de aplicação do gradiente de pressão se relaciona com o equipamento. (6; 28)

A principal vantagem do processo de infusão por vácuo face ao RTM caracteriza-se pela utilização de apenas um molde rígido, complementado com um molde flexível, usualmente, caracterizado por um saco de vácuo, enquanto, no processo RTM é necessário a existência de dois moldes rígidos. Por outro lado, a bomba de vácuo introduz uma flexibilidade que não se encontra presente no processo RTM. Os elevados custos de implementação do processo RTM associado aos custos dos moldes e à sua manutenção traduzem-se num investimento que não é suportado por muitas empresas e em grande parte dos casos não se justifica. (28)

Além disto, apesar do processo de RTM apresentar inúmeras vantagens na fabricação de compósitos, promovendo uma elevada produtividade e um aumento da qualidade dos produtos, este processo também tem as suas desvantagens, nomeadamente, acarreta um grande desperdício de resina para assegurar que o molde esteja totalmente cheio sem a existência de espaços vazios, apresenta um elevado custo das ferramentas devido à necessidade de utilizar dois moldes rígidos, exige um elevado investimento na máquina de injeção de resina, caracteriza-se por um tempo excessivo de cura de resina que limita significativamente a sua produtividade e ainda apresenta uma limitação no tamanho das peças, uma vez que os custos de produção de grandes peças são demasiado elevados. (6; 17; 29)

Em suma, podemos inferir que o processo de RTM é indicado para peças com tamanho reduzido em grandes séries. Para componentes com grandes dimensões em pequenas séries, o processo de infusão a vácuo é o mais indicado e mais utilizado actualmente, visando a redução dos custos de produção. No caso de produção de tampas para bagageira de autocarro o processo de infusão a vácuo apresenta-se como o mais adequado dado a reduzida complexidade das peças e a baixa produção requerida na empresa actualmente. (27; 21)

3.2.2. VIP VERSUS PROCESSO ACTUAL NA EMPRESA

O processo actual da empresa remete para a fabricação de tampas em alumínio, caracterizada por várias etapas de fabricação que complementam processos de corte a laser, etapas de conformação, processos de soldadura e de colagem. Apesar do sucesso dos produtos obtidos este processo está associado a elevados tempos de fabricação, elevado custo de mão-de-obra, elevado investimento na aquisição e manutenção dos equipamentos necessários, desagregação de etapas de fabrico e, acima de tudo, elevado peso dos componentes obtidos.

As principais vantagens do processo de infusão a vácuo face ao processo manual, realizado actualmente na empresa CaetanoBus, traduzem-se numa melhoria a nível ambiental e económico, maior facilidade de processamento e elevada qualidade das peças produzidas. A nível ambiental, este processo permite a fabricação de produtos mais leves para a indústria automóvel que promovem um baixo consumo específico contribuindo deste modo para a redução dos impactos ambientais e da emissão de poluentes para a atmosfera e ainda abdica do uso de adesivos para a incorporação de insertos metálicos nas tampas, que contribuem para as emissões de compostos voláteis e representam riscos à saúde humana. A nível económico, o processo de infusão a vácuo apresenta-se como uma enorme vantagem para a fabricação de produtos, promovendo uma redução de peso que contribui para uma economia de combustível e ainda uma elevada facilidade de consolidar múltiplas partes num só componente, reduzindo o número de etapas associadas ao processo actual, diminuindo assim os tempos de fabricação.

O processo é ainda adaptável a uma elevada gama de materiais de reforço e diferentes tipos de resina que podem ser combinados de forma a obter as propriedades mais vantajosas para a aplicação. A nível da qualidade das peças, o VIP é capaz de produzir componentes com uma excelente qualidade superficial e com elevada consistência dos produtos. Este processo permite a incorporação de insertos no molde com uma elevada adesão de ligação entre os diferentes materiais, superior aos adesivos utilizados actualmente nas tampas de alumínio. (30; 31)

3.3.ASPECTO AMBIENTAL

Os impactos ambientais como a depleção da camada de ozono, o aquecimento global, a acidificação e as alterações climáticas têm suscitado inúmeras preocupações de várias entidades. Os produtos utilizados no nosso dia-a-dia provocam danos ambientais durante o seu ciclo de vida, sobre os quais se têm centrado inúmeros interesses na compreensão e na resolução destes efeitos. (32)

De acordo com os impactos ambientais, as principais opções para o gerenciamento do desperdício de materiais compósitos reforçados por fibra de vidro enumeram-se, por ordem de preferência, como a minimização do desperdício, a reutilização, a reciclagem, a incineração com aproveitamento energético e, por fim, a incineração sem reaproveitamento energético. A opção mais benéfica remete para a redução da produção de desperdício destes materiais através da escolha de um processo de fabrico que comporte o mínimo desperdício de consumíveis. (7; 33)

A sua reutilização é considerada viável mas são ainda discutíveis os benefícios práticos que ela comporta. As suas propriedades têm que ser analisadas dado que os plásticos reforçados por fibra de vidro são constituídos por pelos menos dois materiais que em conjunto originam um material com propriedades distintas das propriedades de cada um individualmente. A forma como estes são utilizados e aplicados são parâmetros que também se devem ter em conta aquando da sua desconstrução e reutilização no final do seu ciclo de vida. (7; 33)

A reciclagem dos materiais compósitos deverá tornar-se uma opção bastante considerável dado o aumento significativo do uso destes materiais e a escassez de volume disponível nos aterros para a sua disposição. Estes materiais comportam dois tipos de resina, as termoplásticas e as termoendurecíveis. As resinas termoplásticas podem ser recicladas através da sua fusão e remodelação, enquanto as termoendurecíveis podem sofrer trituração e o reciclado pode ser utilizado em novos materiais reforçados por fibra de vidro. Outros tratamentos também podem ser utilizados para separar ambos os componentes no sentido de reaproveitar as fibras, tais como, tratamentos térmicos nos quais os compósitos são aquecidos a elevadas temperaturas para promover a separação das fibras do polímero. (7; 33)

A incineração de materiais reforçados por fibra de vidro com aproveitamento energético é uma opção viável devido ao elevado poder calorífico que estes materiais apresentam. No entanto, é necessário ter em conta que a produção de electricidade através do aproveitamento energético é uma preocupação secundária e que a principal actividade do incinerador é a queima de produtos domésticos. Por fim, a incineração sem aproveitamento energético e a disposição em aterro são as opções menos favoráveis porque estas resultam em perdas de energia que pode ser aproveitada. (3; 7; 33)

O Processo de Infusão a Vácuo tem ganho popularidade entre os processos de fabricação de materiais compósitos, uma vez que, está associado a um baixo custo de ferramentas e permite a completa eliminação dos compostos orgânicos voláteis. Uma das principais motivações para a implementação da infusão a vácuo é a redução ou eliminação do estireno. Além do seu odor desagradável, a emissão de compostos voláteis como o estireno contribui para o aumento da poluição do ambiente. Em muitos países é exigido por lei um sistema de extracção destes compostos, principalmente, quando é excedido um determinado valor de emissão. No processo de infusão a vácuo, o saco de vácuo é introduzido sobre o material de reforço, caracterizando o processo como uma técnica em molde fechado que previne, deste modo, a emissão de estireno. (30)

3.4.ASPECTO ECONÓMICO

A acessibilidade é um factor primordial na indústria dos materiais compósitos, sendo considerada um parâmetro essencial na implementação de qualquer processo de fabrico ou componente em material compósito. Para o alcance da acessibilidade da peça é importante avaliar e estimar os custos de processamento e os riscos associados em cada etapa de fabrico, especialmente na fase de concepção e definição de design. O processo de infusão a vácuo é caracterizado como uma técnica de baixo custo mas a sua implementação depende de características específicas do produto, nomeadamente, do design, do tamanho da peça e das propriedades mecânicas requeridas para uma dada aplicação. A implementação deste processo não comporta elevados custos, dado que, se caracteriza por uma tecnologia de fácil execução sendo por isso adaptável às necessidades da empresa.

A grande vantagem deste processo é que ele não requer equipamentos que tornam outras tecnologias mais dispendiosas, como por exemplo, a construção de infraestruturas com equipamento de ventilação. Esta implementação não é necessária porque se trata de um processo de fabrico em molde fechado onde as emissões voláteis são reduzidas, apesar de ser necessário um controlo adequado da temperatura e da humidade para uma melhor optimização do processo de fabrico. O equipamento necessário neste processo para a impregnação de resina no interior do molde resume-se a uma bomba de vácuo, contrariamente ao RTM, que necessita de um equipamento de injeção de resina específico que engloba custos muito elevados e por vezes desnecessários.

As ferramentas necessárias ao processo de infusão a vácuo apresentam custos reduzidos que estão inseridos no preço da peça. Os materiais utilizados neste processo são apenas constituídos por uma fita adesiva, tubos de plástico, saco de vácuo, fibra de vidro, resina e tecidos que melhoram a uniformidade do fluxo de resina.

Podemos ainda concluir que o investimento inicial da implantação deste processo é grandemente reduzido devido à utilização de apenas um molde rígido por peça, não sendo necessário o investimento em dois moldes. O investimento nos moldes é um factor que agrava muito o aspecto económico de fabricação de um componente exigindo condições necessárias ao seu armazenamento e manutenção. (34)

Apesar de todos os consumíveis utilizados no processo de infusão a vácuo, o custo efectivo deste processo é amortizado quando são tidos em consideração parâmetros relacionados com a mão-de-obra, o tempo útil dos moldes e a redução do peso do componente, dado que, é necessária menos quantidade de resina para fabricação de componentes por infusão a vácuo quando comparado com o RTM. Além disto, este processo possibilita ainda um melhor cumprimento dos regulamentos existentes relativos a questões ambientais e de saúde humana. (35)

Face às actuais características do mercado e ao aumento da concorrência, quer interna quer externa, que as empresas têm que enfrentar, o conhecimento dos custos associados à produção é cada vez mais importante. Apenas com esse conhecimento e recorrendo a técnicas de análise e preparação de trabalho se consegue, efectivamente, reduzir custos e aumentar a produtividade da empresa. Na tabela seguinte estão representados os custos de produção de uma tampa de compartimento de bagageira em material compósito produzida por infusão a vácuo para diferentes dimensões de série.

Tabela 3 – Análise económica de uma tampa de bagageira.

Custos de Produção	Custo/Tampa (Série = 10)	Custo/Tampa (Série = 50)
Mão-de-obra (25€/h)	25	25
Materiais (fibra, resina, tecidos)	150	150
Amortização do molde (600€/molde)	60	12
Total	235	187

Como é possível observar na tabela 3 o custo por tampa de bagageira para uma série de 50 é equivalente a 187 euros de acordo com os valores indicados acima para os diversos parâmetros analisados. Comparativamente, o custo associado ao processo manual actualmente desenvolvido na empresa por cada tampa fabricada é equivalente a 190 euros. Este custo da peça integra os preços da mão-de-obra, processo de colagem, execução de perfil, montagem da estrutura e chapeamento.

Podemos inferir que os preços por tampa em cada um dos processos são equivalentes, mas a longo prazo verificar-se-á um ganho considerável com a economia de combustível devido ao menor peso das tampas em compósito relativamente ao alumínio. A tabela seguinte faz uma referência ao custo de investimento deste processo com os diferentes equipamentos necessários à sua implementação, através da análise de preço existentes nas diferentes marcas associadas.

Tabela 4 – Análise económica do investimento do Processo de Infusão a Vácuo. (36)

Equipamentos	Investimento (€)
Bomba de vácuo	9.000
Máquina Laser (opcional)	5.000
Estufa de vácuo para laboratório	9.000
TOTAL	23.000

3.5.APLICAÇÕES

Hoje em dia existe um grande desenvolvimento na análise, no projecto e na utilização de materiais compósitos promovendo o aumento do número de aplicações e o aumento significativo do volume produzido. Este crescimento conduz-nos à fabricação em série, que se traduz numa redução drástica do custo por unidade, fazendo com que os compósitos se tornem cada vez mais competitivos para as actuais e para futuras aplicações. Como é evidente, os materiais compósitos alargam substancialmente o leque de opções que se colocam aos projectistas e engenheiros de materiais, encontrando-se disseminados por diferentes áreas de actividades que incluem indústrias de grande exigência e visibilidade tecnológica como a aeronáutica e a indústria espacial ou outras como a indústria dos transportes, artigos desportivos, componentes eléctricos e electrónicos e a construção civil. (25)

O processo de infusão a vácuo tem se mostrado muito versátil na fabricação de materiais compósitos de grandes dimensões. Em teoria, o processo pode ser utilizado para componentes de qualquer tamanho, contudo, não é o mais indicado para os mais pequenos com peças complexas ou peças onde o baixo peso combinado com a alta resistência não são parâmetros exigidos. Esta técnica é mais adequada para componentes de grandes dimensões produzidas em pequenas séries, tais como, painéis para veículos, cascos de barcos e pavimentos e pás de turbinas eólicas. (25)

Na indústria aeronáutica os desafios tecnológicos são permanentes e a sua especificidade resulta do tipo de produção em pequena escala, onde os elevados custos de fabrico podem ser compensados por menores custos operacionais. O objectivo é conseguir estruturas com elevada resistência específica e peso reduzido associados a uma enorme liberdade de concepção do produto.

Na indústria automóvel, os custos excessivos com que se deparam os construtores levam à necessidade de uma elevada cadência de produção a baixos custos. Deste modo, os materiais compósitos ocupam um lugar de destaque no sector automóvel, onde se pretende, essencialmente, obter estruturas de elevada resistência cada vez mais leves promovendo a economia do consumo de combustível. No domínio dos transportes é ainda de salientar outras aplicações como barcos, comboios e novos veículos em desenvolvimento, onde os materiais compósitos desempenham papéis relevantes.

A generalização das aplicações em áreas tão díspares tem contribuído significativamente para a redução do preço dos materiais compósitos e, conseqüentemente, para a sua expansão, devido às suas características de baixo peso, elevada durabilidade, resistência à corrosão, resistência à fadiga e resistência ao atrito.

Os desenvolvimentos mais recentes do processo de infusão a vácuo foram implementados na indústria naval com o principal objectivo de reduzir as emissões de estireno observada nos processos de molde aberto. Contudo tem sido demonstrado recentemente que existe uma grande variedade de produtos que pode ser fabricada por infusão a vácuo. Em baixo estão apresentados alguns exemplos de sectores onde é aplicado o processo de infusão a vácuo, assim como, algumas fotografias de peças obtidas por este processo, figuras 18 a 23. (3; 6)

Tabela 4 – Aplicações do Processo de Infusão a Vácuo.

Sector	Aplicações
Indústria naval	Cascas, pavimentos, escotilhas de iates.
Indústria transporte	Painéis exteriores do veículo e frentes de comboios.
Indústria aeroespacial	Lemes de pequenas aeronaves.
Sector industrial	Ventoinhas, separadores de óleo.
Sector de energia	Painéis solares, pás de turbinas eólicas, materiais de isolamento eléctrico.
Infra-estruturas	Iluminação pública, pontes.
Indústria militar	Cascos de veículos blindados e de navios militares.



Figura 14 - Progressão do fluxo durante a infusão de um casco de um barco Contest 55. (23)



Figura 16 - Infusão a vácuo de um barco modelo Transpac 52. (37)



Figura 18 - Fabricação de células de painéis solares para telhados de casas. (45)



Figura 15 - Acessórios para automóvel em fibra de carbono. (43)



Figura 17- Processo de infusão de resina na indústria automóvel. (44)



Figura 19 - Fabricação de pás de turbinas eólicas pelo processo de infusão a vácuo. (27)

O processo de infusão a vácuo é uma tecnologia que ainda não se encontra totalmente desenvolvida e expandida em aplicações na indústria dos compósitos. O interesse demonstrado desde a década de 80 tem impulsionado a vasta utilização desta tecnologia em empresas de produção de componentes em material compósito. Estas aplicações levam à origem de inúmeras preocupações que exigem uma investigação detalhada em áreas correspondentes ao desenvolvimento de novos materiais, aos equipamentos de processamento e ao controlo do processo.

As aplicações de sucesso da tecnologia de infusão a vácuo e a obtenção de materiais com elevadas propriedades, nomeadamente, uma elevada fracção do volume de fibra e uma reduzida quantidade de espaços livres, têm atraído uma elevada atenção da indústria aeroespacial. O processo de infusão a vácuo é uma tecnologia que, futuramente, não só irá competir com os pré-impregnados produzidos em autoclaves, mas também com outros materiais tradicionais utilizados na indústria aeroespacial. (6)

Uma da indústria que recorre à tecnologia de infusão a vácuo que maior desenvolvimento registou ao longo dos anos é o sector naval. Recentemente, várias empresas de construção naval têm substituído o processo de laminagem manual pela infusão a vácuo. Uma das maiores motivações para esta implementação restringe-se à redução/eliminação das emissões dos compostos voláteis. A utilização do VIP no sector naval permitiu, recentemente, o desenvolvimento do processo em sistema de sandwich, com a possibilidade da incorporação de núcleos, geralmente espumas, no laminado, que promovem elevada consistência e estabilidade dimensional e ainda melhoram significativamente a velocidade de fluxo da resina injectada. Uma das aplicações mais recentes do processo de infusão a vácuo nesta indústria remete para a fabricação de barcos desportivos, iates e modelos offshore como observado nas figura 14 e 15. Os modelos que surgem actualmente incidem sobre embarcações de luxo cujo casco é construído pelo sistema de sandwich com espuma PVC, altamente resistente, leve e com excelentes propriedades de isolamento térmico e resistência química. Esta mudança deve-se a inúmeras vantagens do sistema, tais como, menor ciclo de moldagem, menor índice de horas de trabalho, redução de peso e melhoria da resistência e da qualidade do casco. (30; 38; 39)

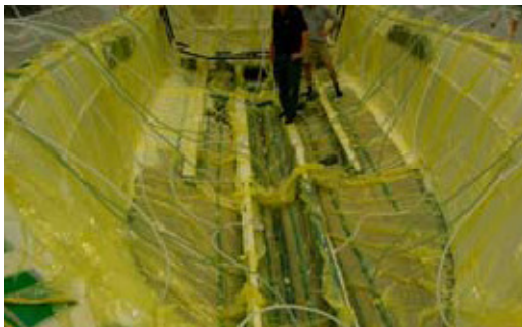


Figura 20 - Processo de infusão a vácuo utilizado na construção de um iate modelo 4400 SY. (39)



Figura 21 - Fotografia do iate modelo 4400 SY. (39)

Outra grande aplicação desta tecnologia incide sobre a indústria de energia, que representa um elemento chave no desenvolvimento sustentável. O processo de infusão a vácuo é utilizado na fabricação de pás de hélice para o rotor de turbinas eólicas, figura 16. A competição entre os produtores destas pás de hélice levou a uma optimização dos procedimentos de produção. A actualização do mercado com novos tipos destes componentes leva a um aumento significativo do seu comprimento para o alcance de maiores níveis de captação de energia. Em 2004 foi produzida a maior pá eólica do mundo com 61,5 metros de comprimento, Figura 23, a combinação de espumas PVC com o processo de infusão a vácuo permitiu manter o seu peso abaixo das 18 toneladas. O novo design e a tecnologia existente pretendem reduzir os custos de energia produzida através dos rotores eólicos. (27; 40)

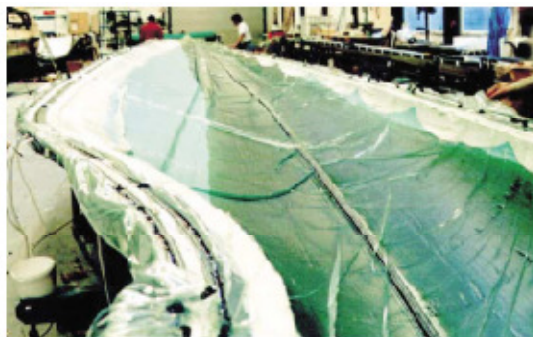


Figura 22 - Pá de hélice para rotor de turbina eólica durante o processo de infusão a vácuo. (27)



Figura 23 - Fotografia da maior pá eólica do mundo com 61,5 metros de comprimento produzida pela "LM GlassFibre". (38)

4. ESTUDO EXPERIMENTAL

Actualmente a utilização de materiais é suportada por uma realização prévia de ensaios a fim de caracterizar as suas propriedades, qualidades e funcionalidades antes da sua aplicação prática. Uma avaliação mais rigorosa do desempenho e do comportamento de um determinado material é realizada quando é ensaiado um protótipo desse componente. Contudo, esta metodologia é a mais dispendiosa, uma vez que está restrita a uma fase mais avançada do produto para que os resultados estejam em conformidade com a realidade. Posto isto, há a necessidade de realizar ensaios a amostras representativas com o intuito de analisar e contornar os demais obstáculos enfrentados. Um problema comum durante a produção de amostras para a realização de ensaios refere-se à obtenção de uma amostragem representativa do componente. Naturalmente, as tecnologias, os materiais e os parâmetros de fabrico do componente devem ser idênticos para não haver discordância de resultados.

O presente trabalho foi desenvolvido com estruturas híbridas, que consistem em subcomponentes de material compósito e metálico. Este estudo baseia-se em aumentar a resistência das ligações entre ambos os materiais com recurso a tratamentos de desengorduramento, aumento da rugosidade e perfurações nos insertos metálicos. As perfurações contribuíram para a redução da incompatibilidade elástica entre o alumínio e o compósito reforçado por fibras. O trabalho consistiu na realização de vários ensaios mecânicos com o objectivo de analisar as diferentes propriedades dos materiais e prever as respostas mecânicas às diferentes influências externas que existem ao longo do seu tempo de vida útil.

Os ensaios de tracção foram realizados para testar as propriedades de adesão entre um material compósito e um metal. Os provetes ensaiados caracterizavam-se por uma sobreposição destes dois materiais numa área de secção de 120 mm^2 . Os primeiros provetes foram fabricados pelo processo de infusão a vácuo inserindo os componentes metálicos no interior das fibras do material compósito antes da infusão. Posteriormente, nos segundos provetes, as amostras de material compósito foram produzidas pelo processo de infusão a vácuo mas, contrariamente ao anterior, os componentes metálicos foram inseridos após o processo de infusão a vácuo com o auxílio de um adesivo estrutural designado Sikaflex – 252 utilizado actualmente na colagem dos insertos metálicos nas tampas laterais de bagageira dos autocarros produzidos na CaetanoBus. Estes procedimentos tinham como principal objectivo observar e comparar as diferenças entre as propriedades de adesão de ambas as amostras.

4.1.ADESÃO DE LIGAÇÕES ENTRE COMPÓSITO E METAL

4.1.1. PRODUÇÃO DE AMOSTRAS COM INTRODUÇÃO DE INSERTOS NO PROCESSO

O equipamento e o material necessário ao processo de infusão a vácuo foram fornecidos pelo PIEP, onde foi realizada a fabricação das amostras para os ensaios de tracção. Os insertos metálicos utilizados para a produção dos provetes foram cortados e perfurados na Caetano Components S.A..

A fabricação das amostras foi realizada em duas infusões a vácuo distintas, onde foram implementadas variações nos parâmetros de posicionamento e nas propriedades de adesão na superfície destes materiais. Na primeira infusão os insertos metálicos com 2mm de espessura foram colocados no topo das fibras e na segunda infusão os insertos foram colocados no interior das fibras.

Em cada uma destas infusões introduziu-se ainda outras variáveis nos insertos metálicos, nomeadamente, um tratamento de superfície caracterizado por um desengorduramento com acetona e um aumento da rugosidade das peças com o auxílio de lixas e, ainda, perfurações realizadas nas amostras metálicas, de pequeno diâmetro, com o intuito de analisar e comparar a adesão de acordo com a implementação destas variáveis, como se observa na Figura 25.

Nas duas infusões foram produzidas 40 amostras, das quais 20 foram colocadas no topo das fibras na primeira infusão a vácuo e as restantes 20 no interior das fibras na segunda infusão. Em cada uma das infusões apenas 10 amostras foram submetidas a um tratamento prévio de limpeza, desengorduramento e aumento da rugosidade. As restantes 10 amostras foram utilizadas sem qualquer alteração prévia na superfície. Para a análise de mais uma variável, em cada categoria de 10 amostras, foram realizadas perfurações em 5 amostras de pequeno diâmetro para observar a adesão das ligações entre o compósito e o metal com maior impregnação de resina.

Os materiais utilizados na execução do processo de infusão a vácuo estão enumerados de seguida, na tabela 5, assim como a sua descrição e funcionalidade. Posteriormente é apresentado um esquema do processo de infusão a vácuo desenvolvido neste trabalho, Figura 24. De seguida é apresentado um desenho de um exemplo de um inserto metálico utilizado na fabricação das amostras, especificando as suas dimensões, Figura 25 e, por fim, é apresentado e um esquema ilustrativo da disposição dos materiais no molde e representação esquemática do equipamento durante o processos de infusão a vácuo, Figura 26.

Tabela 5 – Materiais utilizados na fabricação das amostras pelo processo de infusão a vácuo.

Materiais utilizados	Descrição
Fibra de Vidro	Tipo de reforço do material compósito que promove elevada resistência à tracção, à flexão e ao impacto.
Peel Ply	Camada de nylon colocada entre o laminado e o “flow mesh” que promove a textura e a limpeza da superfície para uma laminagem adicional ou uma colagem secundária.
Flow mesh	Malha de nylon que promove o fluxo de resina ao longo do material de reforço e contribui para a sua distribuição homogênea.
Spiral tube	Tubo de plástico incorporado no canal de entrada de resina que promove o movimento de fluxo de resina.
Blue mesh	Malha de nylon em forma de tubo que envolve o “Spiral tube” que contribui para uma melhor distribuição do fluxo de resina que entra no reforço.
Saco de vácuo	Saco de plástico utilizado como camada final do processo, sendo posteriormente submetido à pressão do vácuo para a infusão de resina.
Bomba de vácuo	Equipamento destinado à injeção de pressão de vácuo para o interior do molde.
Detector de vazamento ultra sónico	Equipamento que detecta a existência de fugas de ar após a injeção da pressão de vácuo no interior do molde.
Tacky tape	Fita adesiva utilizada para unir o saco de vácuo ao molde e promover a vedação do laminado, impedir a entrada de ar e assegurar a pressão de vácuo.

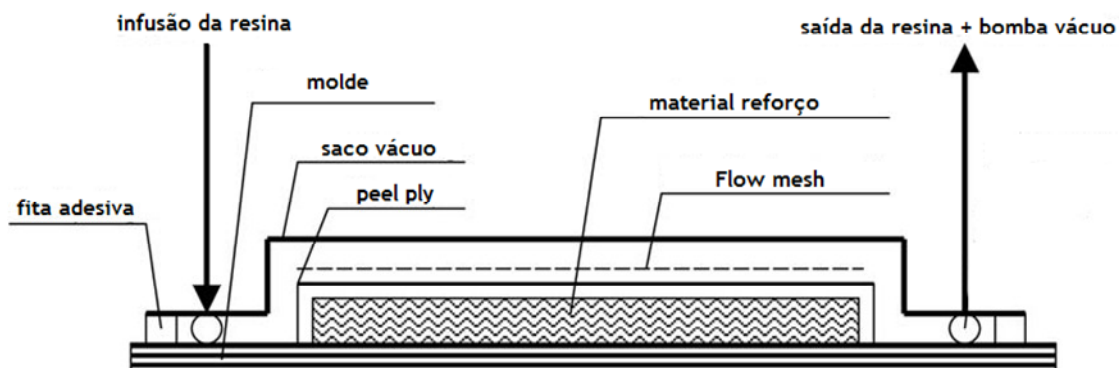


Figura 24 – Esquema do processo de infusão a vácuo utilizado na fabricação das amostras.

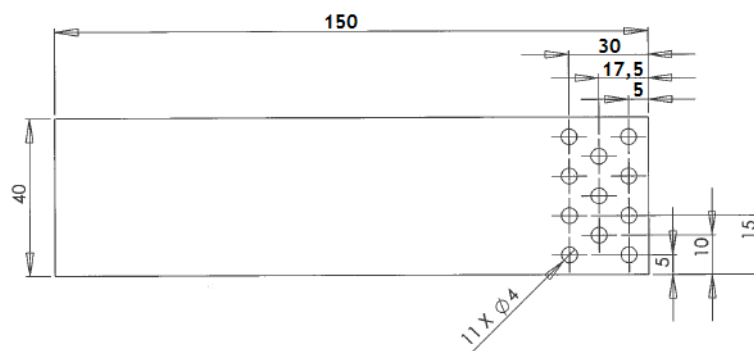


Figura 25 - Dimensões dos inserts metálicos utilizados na produção das amostras (mm).

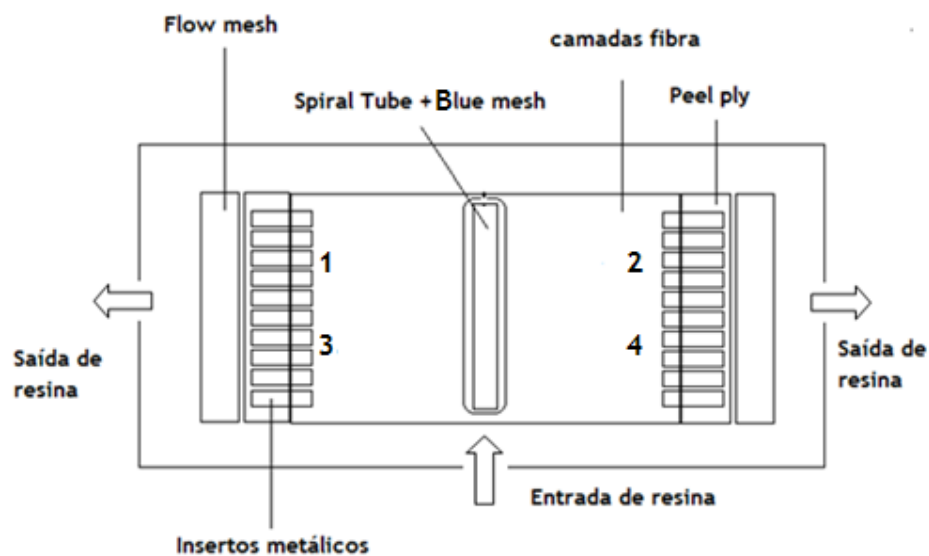


Figura 26 - Esquema representativo das amostras obtidas no processo de infusão a vácuo: (1) Com limpeza e sem perfurações, (2) Com limpeza e com perfurações, (3) Sem limpeza e sem perfurações, (4) Sem limpeza e com perfurações.

Um bom planeamento de uma infusão pode resumir-se aos seguintes factores:

1. **O início do projecto:** nesta fase será importante planear a chegada dos diversos materiais para o projecto e definir o lay-out do processo para uma optimização da infusão.
2. **Antes do início da infusão:** é necessário misturar bem a resina para permitir o bom escoamento inicial na peça para a circulação na tubulação e nos principais canais de resina. Antes deste passo deve ser assegurado o vácuo no interior do molde sem a existência de fugas para o exterior.
3. **Depois da infusão e antes da resina curar:** esta é uma fase crítica do processo onde a resina já preencheu toda a peça e fica a curar durante um período de aproximadamente 4 horas. Nesta etapa é ainda importante verificar o escoamento de resina nos tubos especialmente observando se existe a formação de drenos devido à aplicação do vácuo.
4. **Depois da infusão e depois da resina curar:** é aconselhável retirar todos os consumíveis do processo antes da cura, caso contrário, será bastante difícil de os remover.

Tipicamente este processo inicia-se pelo posicionamento dos materiais de reforço no molde rígido e no caso de existirem superfícies verticais é comum a utilização de adesivos de spray que promovem adesão suficiente para fixar os materiais na sua posição. Posteriormente, o laminado é coberto com uma combinação de materiais que facilitam o fluxo de resina e promovem a fácil remoção do laminado após a cura. Estes materiais são designados por “flow mesh” e “peel-ply” respectivamente. O “flow mesh” promove o aumento do fluxo de resina ao longo do laminado permitindo o transporte uniforme de resina por toda a superfície. O “peel-ply” permite a remoção do “flow mesh” após a cura, melhora o fluxo de resina por todo o laminado e ainda confere textura à superfície para posteriores ligações de estruturas de suporte. Após a inserção da camada de “flow mesh” são incorporados os tubos de alimentação promovendo uma rápida injeção de resina para a superfície e ainda para permitir uma melhor distribuição do vácuo pelo laminado. No final é introduzido o saco de vácuo sobre o laminado e os tubos de alimentação são ligados à fonte de vácuo. O saco é selado com o auxílio de uma fita adesiva capaz de promover a adesão imediata à superfície e posteriormente toda a superfície é examinada com um detector ultra-sónico para assegurar inexistência de fugas de ar no interior, que contribuem para a criação de espaços livres e perdas de vácuo que retardam ou mesmo interrompem o processo de infusão. A injeção de vácuo no interior do molde resulta numa diferença de pressão que impulsiona o fluxo de resina para o seu interior originando um produto embebido em resina. (34)

As figuras 27 a 35 apresentam o procedimento adoptado para a realização do processo de infusão para o fabrico das amostras com insertos metálicos incorporados no próprio processo.



Figura 27 - Corte de 8 camadas de fibra, 1 camada de peel-ply e 1 camada de flowmesh.

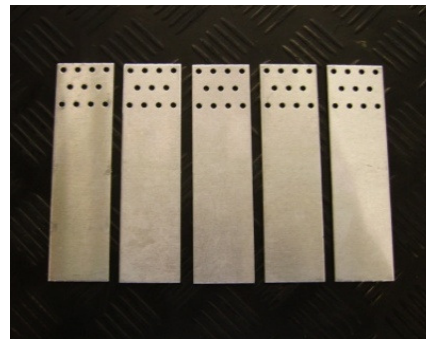


Figura 28 - Perfuração, desgorduramento e lixamento de algumas amostras.

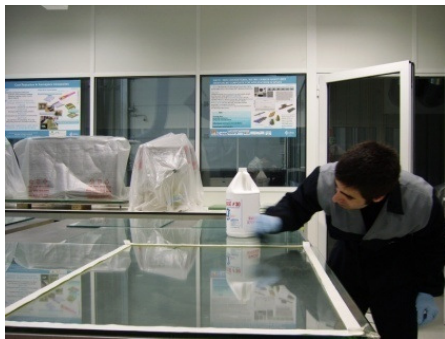


Figura 29 - Desengorduramento do molde, colocação da fita adesiva e aplicação do agente desmoldante.

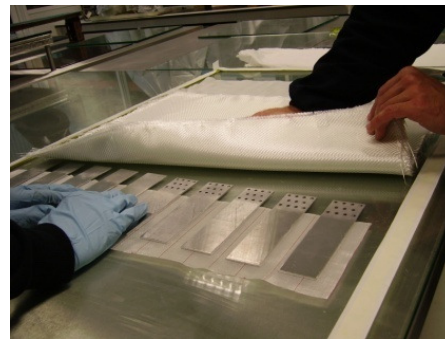


Figura 30 - Colocação de oito camadas de fibra no centro, de uma camada de peel-ply em cada extremidade e dos insertos metálicos.

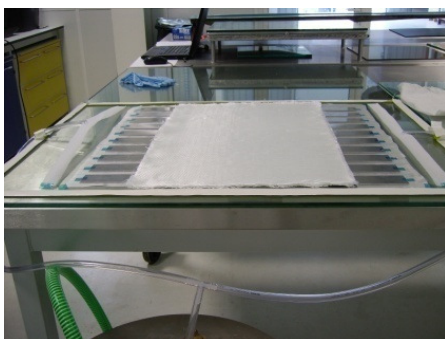


Figura 31 - Colocação das camadas de flowmesh nas extremidades juntamente com os canais de entrada e de saída de resina.

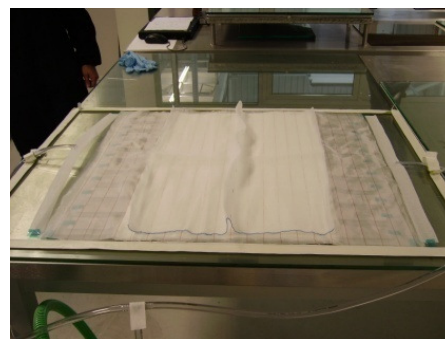


Figura 32 - Colocação da camada de peel-ply e da camada de flowmesh sobre as fibras.

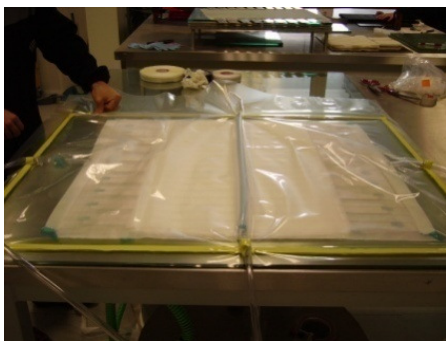


Figura 33 - Colocação do “Blue mesh” e do saco de vácuo por toda a peça isolando-o com fita adesiva.



Figura 34 - Aplicação de vácuo a 0,98 bar até completa estabilização.

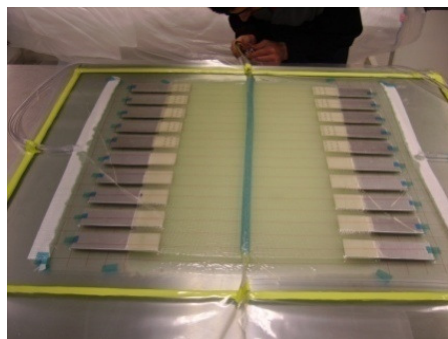


Figura 35 – Início do processo de infusão de resina e da cura de resina.

4.1.2. PRODUÇÃO DE AMOSTRAS SEM A INTRODUÇÃO DE INSERTOS NO PROCESSO

Um dos factores essenciais para o sucesso de uma ligação com a utilização de um adesivo é a compatibilidade entre o adesivo e o substrato. A compatibilidade é caracterizada por uma maior ou menor facilidade com que o adesivo molha a superfície, consequência da energia superficial de cada um. O tratamento de superfície de colagem é portanto uma condição necessária para o estabelecimento de uma forte ligação. A ligação por adesivo caracteriza-se por uma sobreposição simples em que a carga é transmitida entre substratos por tensões de corte nos adesivos. (41)

Os adesivos utilizados neste trabalho são classificados em adesivos estruturais, do tipo Poliuretano e são os adesivos utilizados na Caetanobus para a incorporação de insertos metálicos nas tampas de compartimento de bagageira. As suas propriedades são caracterizadas por uma boa flexibilidade, um bom comportamento a baixas temperaturas, uma boa resistência ao arrancamento e à abrasão e uma boa tenacidade.

Tal como no procedimento anterior para o processo de infusão a vácuo, apenas 10 amostras foram submetidas a um tratamento prévio de superfície caracterizado por uma limpeza e desgorduramento com o uso de acetona e desgaste da superfície com o auxílio de lixas de granulometria 240 μ m com o objectivo de aumentar a rugosidade e a área de contacto entre o adesivo e o substrato. Este procedimento contribuiu para uma melhor interligação mecânica entre ambos os materiais. O objectivo é a eliminação de impurezas, o desgorduramento, o aumento da rugosidade e a remoção de contaminantes prejudiciais à adesão entre ambos os materiais.

O esquema representativo das amostras produzidas está evidenciado na figura 36, onde se pode observar a posição efectiva do adesivo e as dimensões das amostras utilizadas.

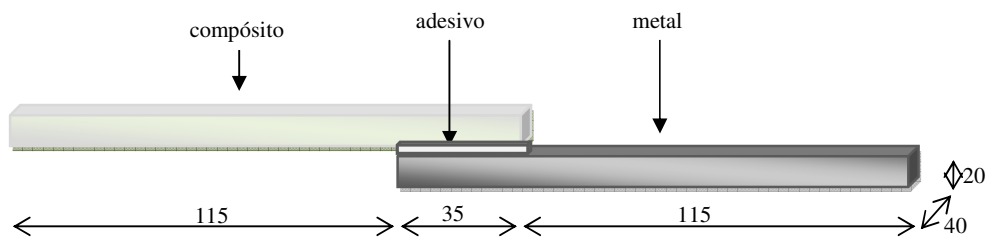


Figura 36 - Esquema representativo das dimensões (mm) de uma junta colada em sobreposição simples de um material compósito com um metal.

4.1.3. ENSAIOS DE TRACÇÃO

Os ensaios de resistência à tracção foram conduzidos numa máquina universal Shimadzu, modelo AG-A, Figura 37, com uma velocidade de 2mm/min e uma carga máxima de 250 KN. Em baixo apresentam-se duas figuras que representam a máquina de tracção e o ensaio de tracção.



Figura 37 - Máquina de tracção utilizada nos ensaios mecânicos de tracção.

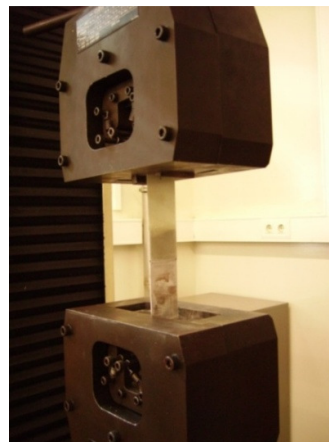


Figura 38 - Exemplo de amostra utilizada no ensaio de tracção.

Os resultados obtidos nos ensaios de tracção das amostras de compósito e alumínio estão apresentados na tabela 7 de acordo com as categorias de posicionamento no topo das fibras, no interior das fibras e, ainda, com utilização do adesivo estrutural.

Tabela 7 – Resultados obtidos nos ensaios de tracção dos valores de resistência máxima.

Posicionamento Insertos	Desengorduramento e aumento da rugosidade	Perfurações (Ø4mm)	Resistência máxima amostras	
			Rm (MPa)	Desvio padrão
Topo das fibras	Não	Não	6,40	±4,60
		Sim	12,18	±1,91
	Sim	Não	40,00	±12,11
		Sim	43,39	±6,40
Interior das fibras	Não	Não	22,61	±7,00
		Sim	39,71	±10,8
	Sim	Não	64,84	±3,70
		Sim	68,70	±6,99
Adesivo estrutural Sikaflex - 252	Não	Não	5,95	±0,91
		Sim	6,83	±1,36
	Sim	Não	9,35	±1,58
		Sim	8,64	±0,81

Os resultados obtidos na análise dos dados nos ensaios de tracção demonstram que a resistência da adesão mais elevada se verifica nas amostras produzidas pelo processo de infusão a vácuo, comparativamente às amostras nas quais se utilizou o adesivo estrutural para a ligação do metal, atingindo um valor máximo de $68,70 \pm 6,99$ MPa, para o caso dos provetes cujos insertos metálicos foram colocados no interior do material de reforço antes da infusão a vácuo, com tratamento de superfície e perfurações.

Relativamente às variantes impostas nos insertos metálicos, podemos inferir que a inserção de perfurações no material metálico beneficia a adesão das ligações entre ambos os materiais, como é possível observar no gráfico da Figura 39. Este aumento de resistência deve-se à penetração da resina no interior das perfurações, garantindo deste modo uma maior adesão entre ambos os materiais. Por outro lado foi também possível observar que a adesão das ligações entre os dois materiais é significativamente mais elevada nas amostras que foram submetidas ao tratamento de superfície, onde o desgorduramento e o aumento da rugosidade das superfícies garantiram uma maior adesão ao compósito, como é possível observar na Figura 40.

Durante os ensaios de tracção todas os provetes produzidos pelo processo de infusão a vácuo com a incorporação dos insertos metálicos no interior das fibras, com tratamento de superfície e, com e sem perfurações, sofreram a ruptura no alumínio, indicando deste modo uma resistência de ligação superior à resistência máxima do alumínio. A zona de fractura localiza-se na amostra de alumínio, próxima da primeira linha de perfurações. As restantes amostras sofreram ruptura na zona de ligação, à excepção de dois provetes, em cinco, em que os insertos foram colocados no interior das fibras, sem tratamento de superfície e com perfurações, sofreram também ruptura no alumínio.

Estes resultados demonstram que a resistência de ligações das amostras com os insertos colocados no interior das fibras é maior comparativamente às amostras que apresentam os insertos no topo das fibras e muito mais elevada relativamente à utilização de adesivos na ligação dos materiais.

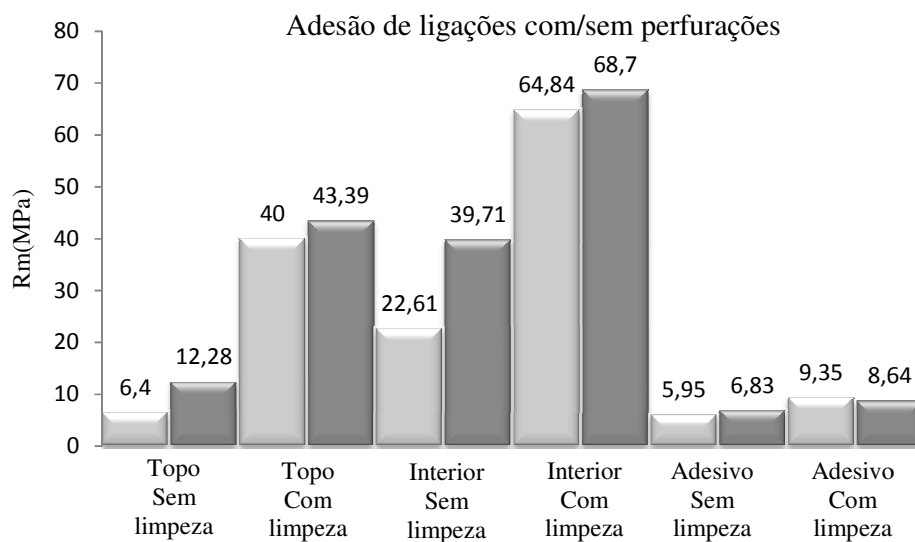


Figura 39 - Gráfico representativo dos valores de resistência máxima obtidos nos ensaios de tracção para efeito comparativo entre a adesão de ligações com /sem perfurações nos insertos metálicos. As barras de cor cinzento claro representam as amostras sem perfurações e as de cor cinzento escuro representam as amostras com perfurações.

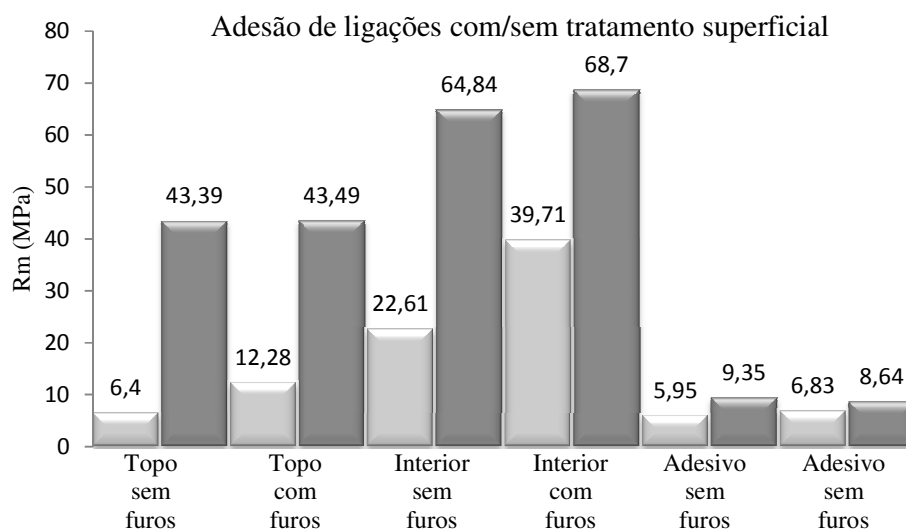


Figura 40 - Gráfico representativo dos valores de resistência máxima obtidos nos ensaios de tracção para efeito comparativo entre a adesão de ligações com/sem tratamento superficial nos insertos metálicos. As barras de cor cinzento claro representam as amostras sem tratamento e as de cor cinzento escuro representam as amostras com tratamento.

4.2. COMPORTAMENTO DE INSERTOS METÁLICOS EM MATERIAL COMPÓSITO

Este ensaio teve como principal objectivo testar a ocorrência do efeito de delaminação nas dobradiças de uma tampa de bagageira de um autocarro submetendo-a a um ensaio cíclico que simulava o movimento de abrir e fechar da tampa. A delaminação é considerada um dos principais modos de falha observados em materiais compósitos, caracterizando-se pela separação das camadas de fibra reforçadas. A principal origem da delaminação caracteriza-se por descontinuidades no material que promovem o aumento da tensão interlaminar.

O comportamento dos insertos metálicos em material compósito foi observado num ensaio de resistência à fadiga realizado na Caetano Components S.A., onde uma tampa da bagageira do modelo de autocarro Levante produzida em material compósito pelo processo de infusão a vácuo foi submetida a um ensaio cíclico, que simulava o movimento de abrir e fechar correspondente ao que ocorre na realidade durante o tempo de vida útil da tampa. Os insertos metálicos inseridos na tampa caracterizam-se por pequenos “pins” incorporados na extremidades da tampa onde se localiza a dobradiça, cuja função é suportar todo o peso da tampa durante as solicitações de movimento impostas.

O número de ciclos correspondente ao tempo de vida útil de uma tampa estipulado pela empresa com base em outros ensaios realizados em tampas de bagageira traduz-se em 50 000 ciclos. O ensaio foi realizado numa estrutura, como demonstra a Figura 41 onde o movimento da tampa foi assegurado por um cilindro pneumático submetido à pressão de 5 bar, efectuando um ciclo em cada 15 segundos. O ensaio decorreu ao longo de 12 dias, mais três dias do que era previsto para que o contador completar os 50 000 ciclos, porque ocorreram duas paragens devido a problemas técnicos na estrutura. A tampa suportou a totalidade dos ciclos, sem apresentar qualquer danos na zona da dobradiça e sem apresentar efeitos de laminagem do local onde estavam incorporados os insertos metálicos.



Figura 41 - Fotografia representativa do ensaio de fadiga realizado à tampa em material compósito produzida por infusão a vácuo.



Figura 42 - Fotografia representativa do cilindro pneumático utilizado no ensaio da tampa.



Figura 43 - Fotografia representativa do inserto metálico incorporado na tampa para ser testado durante o ensaio de fadiga.



Figura 44 - Fotografia pormenorizada da estrutura durante o ensaio da tampa.

4.3. RESISTÊNCIA À FLEXÃO DO MATERIAL COMPÓSITO

O ensaio de flexão em três pontos tem uma larga aplicabilidade em materiais compósitos, sendo utilizado para analisar as propriedades de resistência e rigidez do material. Este método foi desenvolvido com o objectivo de analisar as alterações nas propriedades de flexão das amostras ao longo do laminado sujeitas a diferentes condições de impregnação de resina.

4.3.1. ENSAIO DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão foram realizados de acordo com a norma DIN EN ISO 178 Plastics – Determination of Flexural Properties. Estes ensaios foram realizados em 7 amostras de material compósito produzidas durante o processo de infusão a vácuo realizado para a fabricação das amostras para os ensaios de tracção. O ensaio foi executado a uma velocidade de 5mm/min. A tabela 8 representa as dimensões das diferentes amostras para os ensaios de flexão. Na figura 45 apresenta-se um gráfico representativo da curva de deformação versus força de um provete da I Infusão e posteriormente, figuras 46 a 48, os valores de resistência obtidos durante os ensaios para as amostras das diferentes infusões a vácuo.

Tabela 8 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão.

I Infusão		II Infusão		III Infusão	
Dimensões	(mm)	Dimensões	(mm)	Dimensões	(mm)
Espessura	1,4	Espessura	1,2	Espessura	1,4
Largura	25,8	Largura	25,5	Largura	26,2
Comprimento	59,9	Comprimento	59,5	Comprimento	59,8

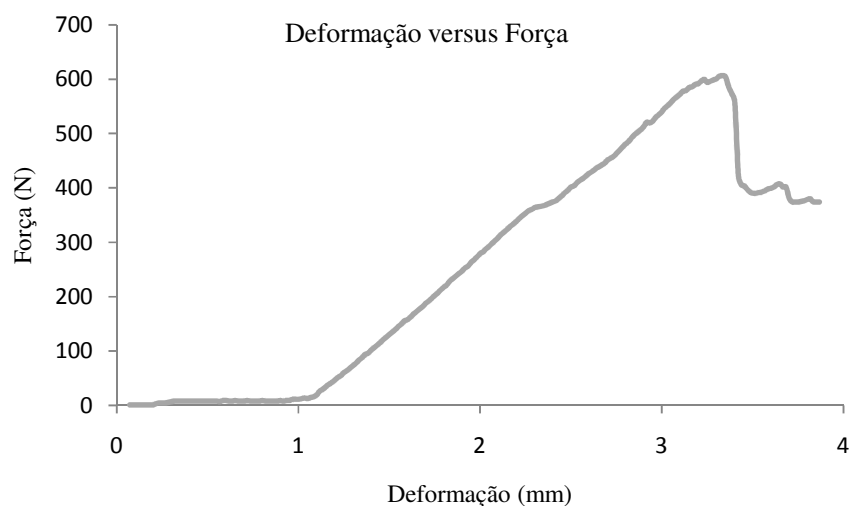


Figura 45 - Representação da curva deformação versus força durante um ensaio de flexão.

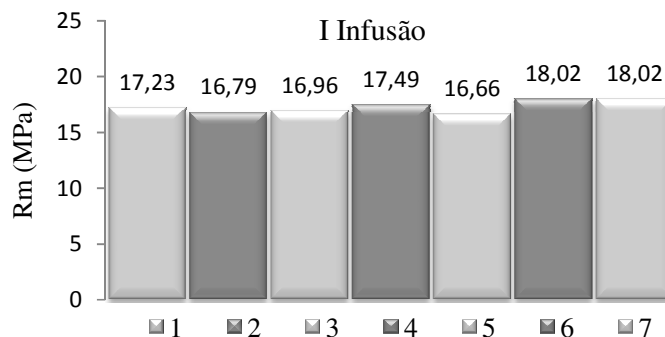


Figura 46 – Gráfico representativo dos valores de resistência máxima à flexão obtidos durante os ensaios de flexão do material compósito produzido na primeira infusão.

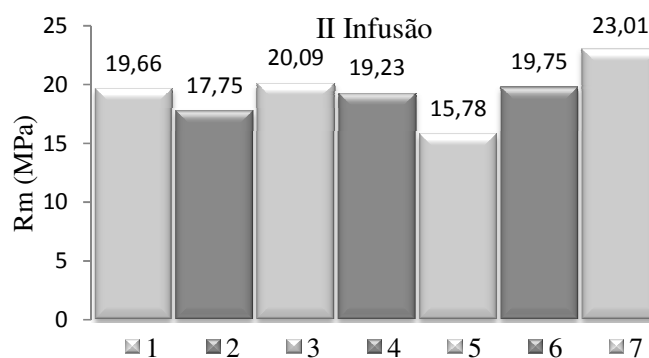


Figura 47 - Gráfico representativo dos valores de resistência máxima à flexão obtidos durante os ensaios de flexão do material compósito produzido na segunda infusão.

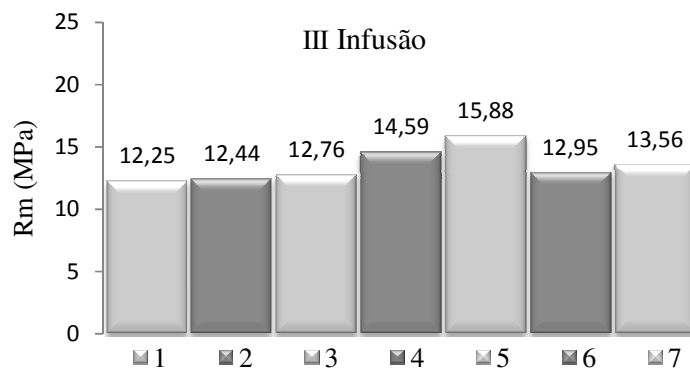


Figura 48 - Gráfico representativo dos valores de resistência máxima à flexão obtidos durante os ensaios de flexão do material compósito produzido na terceira infusão.

5. CONCLUSÕES

Os materiais compósitos apresentam muitas características inovadoras e possuem um grande potencial de utilização como material de engenharia contribuindo no desenvolvimento de novos processos e tecnologias permitindo o alcance de excelentes propriedades mecânicas de resistência, rigidez e baixo peso.

O processo de infusão a vácuo originalmente desenvolvido como uma técnica de baixo custo apresenta-se como uma alternativa para os processos em molde aberto como a Laminagem por Projecção e a Laminagem Manual. A principal vantagem deste processo foi a eliminação da emissão de estireno, através da utilização de apenas um molde rígido inferior e um molde flexível superior, o que resulta numa melhoria ambiental a nível interno e externo sobre as tecnologias de fabricação de compósitos em molde aberto. Outras vantagens deste processo caracterizam-se por uma elevada qualidade do laminado devido a uma melhor impregnação da resina e a um elevado teor de fibra, uma elevada consistência das propriedades do produto e ainda uma reduzida quantidade de matéria-prima.

A resistência da adesão das ligações entre um metal e o compósito pode ser melhorada através da perfuração do material metálico. Podemos inferir que estas perfurações contribuem para uma maior ligação entre o compósito e o inserto aumentando a resistência do material.

O aumento da resistência das ligações também foi alcançado com uma preparação da superfície caracterizada por um desgorduramento e um aumento da rugosidade com o auxílio de lixas. Este factor é aliás determinante e, quando aplicado em situações em que os insertos são colocados no interior das fibras, dispensa a necessidade de perfurações do inserto em alumínio. Em qualquer situação a resistência dos materiais produzidos pelo processo de infusão a vácuo é superior à obtida com a utilização de adesivos estruturais.

Podemos ainda concluir que a tampa de bagageira produzida pelo processo de infusão a vácuo em material compósito suportou a totalidade dos ciclos impostos no ensaio de fadiga para simular o tempo de vida útil da tampa em serviço.

BIBLIOGRAFIA

1. <http://www.caetanobus.pt/>. [Online] [Citação: 20 de 03 de 2009.]
2. Jones, Robert M. *Mechanics of composites materials*. [ed.] Taylor & Francis. 2ª. 1999.
3. Moura, Marcelo e Morais, Alfredo. *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. [ed.] Piblíndústria. 2005.
4. Callister, Jr. *Composites, Material Science and Engineering*. [ed.] John Wiley & Sons Inc. 4ª. 1997. pp. 510-548.
5. <http://www.exelcomposites.com>. [Online] [Citação: 10 de 06 de 2009.]
6. Miracle, Daniel B. e Donaldson, Steven L. *ASM Handbook*. [ed.] ASM International. 2001. Vol. 21.
7. Talreja, Ramesh e Manson, Jan-Anders E. *Comprehensive Composites Materials*. [ed.] Elsevier. 2000. Vol. 2 Polymer Matrix Composites.
8. Rubio, J. Campos e Abrao, A.M. Effects of high speed in the drilling of the glass fibre reinforced plastic: evaluation of the delamination factor. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 715-720.
9. Alawsi, Ghydaa e Aldajah, Saud. Impact of humidity on the durability of E-glass/polymer composites. *Materials & Design* 30 (2009) 2506-2512.
10. Crutchlow, Rick. Changing from open to closed moulding. *Reinforced Plastics* 48 (2004) 40-41.
11. <http://www.netcomposites.com/default.asp>. [Online] 15 de 04 de 2009.
12. Baldan, A. Adhesively-bonded joints in metallic alloys, polymers and composite materials: Mechanical and environmental durability performance. *Journal of Materials Science* 39 (2004) 4729-4797.
13. Kwakernaak, A. e Hofstede, J.C.J. Adhesive Bonding: Providing Improved Fatigue Resistance and Damage Rolerance at Lower Costs. *SAMPE Journal* 44 (2008) 6-15.
14. Khalili, S.M.R. e Shokuhfar, A. Experimental study of the influence of adhesive reinforcement in the lap joints for composite structures subjected to mechanical loads. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 28 (2008) 436-444.
15. Govignon, Q. e Bickerton, S. Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process. *Composites: Part A*: 39 (2008) 1412-1426.
16. Hammami, Adel. Key factors Affecting Permeability Measurement in the Vacuum Infusion Process. *Polymer Composites* 23 (2002) 1057-1067.
17. Yuexin, D. Compression Responses of the Preform in Vacuum Infusion Process. *Chinese Journal of Aeronautics* 21 (2008) 370-377.

18. Rijswijk, K. e Teuwen, J. J. E. Textile fibre-reinforced anionic polyamide-6 composites. Part I: The vacuum infusion process. *Composites Part A: 40* (2009) 1-10.
19. Yenilmez, Bekir e Senan, Murat. Variation of the part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process. *Composites Science and Technology* (2008).
20. Yenilmez, Bekir e Sozer, E. Murat. Compaction of e-glass fabrics preforms in the vacuum infusion process. *composites Part A: 40* (2009) 499-510.
21. Reuterlov, Stefan. Cost effective infusion of sandwich composites for marine applications. *Reinforced Plastics 56* (2002) 30-32.
22. Belingardi, Giovanni e Paolino, Davide Salvatore. Repeated impact response of hand lay-up and vacuum infusion thick glass reinforced laminates. *Intenational Journal of Impact Engineering 25* (2008) 609-619.
23. Wolfe, Art e Weiner, Michael. Comparison of mechanical properties of laminates fabricated using vacuum infusion knitted reinforcements. *Composites Research Journal 1* (2007) 47-52.
24. Tecnology update: vacuum infusion. *Reinforced Plastics 48* (2004) 28-29.
25. Afendi Md e Kirkwood, D. Bubble free resin for infusion process. *Composites: Part A 36* (2005) 739-746.
26. <http://www.lightweight-structures.com>. [Online] [Citação: 12 de 06 de 2009.]
27. Brouwer, W.D. e Labordus, M. Vacuum injection moulding for large structural applications. *Composites Part A: 34* (2003) 551-558.
28. Correia, N.C. Analysis of the vacuum infusion moulding process. *Composites Part A: 36* (2005) 1645-1656.
29. Modi, Dhiren. Active control of the vacuum infusion process. *Composites: Part A 38* (2007) 1271-1287.
30. Gaetzi, Roman. Why vacuum infusion benefits your quality, budget and environmental. *Reinforced Plastics 52* (2008) 28-29.
31. Jacob, Amanda. Automotive composites - the road ahead. *Reinforced Plastics 45* (2001) 28-32.
32. Song, Young and Youn, Jae R. Life cycle energy analysis of fibre-reinforced composites. *Composites: Part A* (2009).
33. Conroy, Amanda e Halliwell, Sue. Composite recycling in the construction industry. *Composites: Part A 37* (2006) 1216-1222.
34. Lunn, Philip. Cost-effective resin infusion. *Reinforced Plastics 53* (2009) 38-39.
35. Leonard-williams, Stephen. The crossover from RTM to resin infusion. *Reinforced Plastics 52* (2008) 28-29.

36. <http://www-thermo.com>. [Online] [Citação: 26 de 05 de 2009.]
37. <http://www.lof-tech.com/index-en.html>. [Online] [Citação: 24 de 05 de 2009.]
38. <http://barracudatec.com.br/index.html>. [Online] [Citação: 24 de 05 de 2009.]
39. <http://www.rivierayachting.com/index.html>. [Online] [Citação: 16 de 06 de 2009.]
40. Schubel, P.J. Technical cost modelling for a generic 45-m wind turbine blade produced by vacuum infusion. *Renewable Energy* (2009) 1-7.
41. Cheuk, P.T. e Wang, C.H. Fatigue crack growth in adhesively bonded composite-metal double-lap joints. *Composites Structures* 57 (2002) 109-115.
42. Bergstrom, Rainer e Piironen, Olli. Improving surface quality in vacuum infused parts. *Reinforced Plastics* 52 (2008) 26-28,30.
43. <http://www.moddedmustangs.com/forums>. [Online] [Citação: 26 de 05 de 2009.]
44. <http://autospies.com>. [Online] [Citação: 06 de 06 de 2009.]
45. <http://www.treehugger.com>. [Online] [Citação: 20 de 06 de 2009.]
46. Cao, Jun e Grenestedt, Joachim L. Design and testing of joints for composites sandwich/steel hybrid ship hulls. *Composites Part A: 35* (2004) 1091-1105.
47. Melograna, Joseph D. e Grenestedt, Joachim L. Improving joints between composites and steel using perforations. *Composites Part A: 33* (2002) 1253-1261 .
48. Davim, J.P. e Magalhães, A.G. *Ensaio mecânicos e tecnológicos*. [ed.] Publindústria. 2ª. 2004.
49. Tzetzis, D. e Hogg, P.J. Bondline toughening of vacuum infused composite repairs. *Composites: Part A* 37 (2006) 1239-1251.